11 Physik

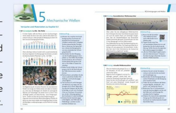


Gymnasium Bayern

So können Sie mit diesem Buch arbeiten

Jetzt geht es los

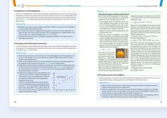
Versuche und Materialien



Ein Kapitel beginnt häufig mit diesen Seiten. Sie enthalten eine große Auswahl an Versuchsvorschriften und Materialien, immer begleitet durch eine Reihe von Auswertungsfragen. Die Inhalte sind immer einem Unterkapitel zugeordnet und sollten vor dem Unterkapitel bearbeitet werden. Sie können dadurch die neuen Inhalte selbstständig entdecken. Die Kompetenzerwartungen, die an Sie gestellt werden, werden hier in besonderem Maße abgedeckt. Dabei wird unterschieden zwischen **Einstiegen**, die an das Thema heranführen, und **Lernaufgaben**, bei denen Sie sich das Thema selbstständig erarbeiten. Speziell die Lernaufgaben sind sehr wichtig, um das nötige physikalische Verständnis des Themas zu erlangen. Wenn Sie selbst einen Versuch durchführen sollen, wird das mit einem (V) gekennzeichnet. Manchmal wird eine bestimmte Fachmethode benötigt, um den Arbeitsauftrag zu bearbeiten. Diese Methode wird dann in einem grünen Kasten auf der Seite vorgestellt und erklärt.

Ran an die Praxis

Schülerexperimente

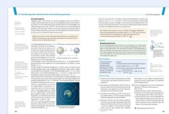


Experimente sind in der Physik von entscheidender Bedeutung, um neue Erkenntnisse zu gewinnen. Deswegen gibt es auf diesen Seiten ausführliche Erläuterungen und Auswertungsfragen, mit denen Sie selbstständig die vorgestellten Experimente durchführen können.

Auch hier werden die benötigten Methoden kurz vorgestellt.

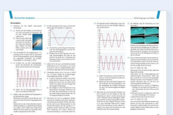
Die Theorie

Erarbeitung



Auf diesen Seiten wird der neue Stoff erklärt, wir nennen sie daher auch Theorieseiten. Die von Ihnen durchgeführten Experimente und bearbeiteten Materialien werden dadurch besser verständlich. Damit Sie das Wichtigste gut lernen, gibt es auf jeder Doppelseite einen oder mehrere Kästen mit einem Merksatz. An ausgewählten Stellen finden Sie auch wieder einen grünen Kasten, der Ihnen eine benötigte Methode vorstellt. Bilder und Tabellen veranschaulichen die Inhalte und liefern Daten, kleine Info-Kästen am Rand bieten Zusatzinformationen zum Text. Zum Anwenden des neu gewonnen Wissens gibt es auf jeder Doppelseite passende Arbeitsaufträge, die teilweise wieder mit einem (V) gekennzeichnet sind. Es gibt blaue und schwarze Aufgaben. Zu den schwarzen Aufgaben finden Sie Lösungshinweise. Damit Sie lernen, wie Sie bei den Aufgaben vorgehen müssen, gibt es häufig auch eine Musteraufgabe, die das Vorgehen verdeutlicht.

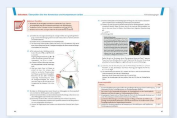
Alles klar?



Vermischte Aufgaben

Hier finden Sie zum Ende des Kapitels nochmal einige umfangreiche Aufgaben, die teilweise materialbasiert sind. Die „Basisaufgaben“ auf der ersten Seite sind etwas kürzer gehalten und befassen sich immer mit einem einzelnen Thema. Die „Zusammenfassenden Aufgaben“ können alle Themen des Kapitels aufgreifen und miteinander vernetzen. Sie helfen Ihnen also dabei, das im Kapitel Gelernte nochmal zu vertiefen und bereiten Sie dadurch gut auf den im Anschluss folgenden Selbsttest vor.

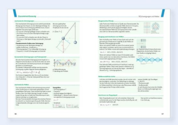
Ziel erreicht?



Selbsttest

Die Seiten helfen Ihnen dabei, festzustellen, ob Sie die neuen Inhalte des Kapitels verstanden haben. Es gibt zu jedem Kompetenzbereich Aufgaben, die Sie lösen und mit den bereitgestellten Lösungen abgleichen können. Sie können Ihre Leistung dabei selbst bewerten. Schneiden Sie in einem Bereich nicht so gut ab, bekommen Sie im Auswertungskasten Informationen, welche Stellen im Buch Sie nochmal genauer ansehen sollten.

Das weiß ich – das kann ich



Zusammenfassung

Die wichtigsten Inhalte und Kompetenzen, die Sie zum jeweiligen Thema gelernt haben, werden auf diesen Seiten kompakt zusammengefasst. Damit können Sie sich gut auf eine Klassenarbeit vorbereiten.

Bildlich gesprochen: Erklärung der Symbole

- V — Versuch, den Sie selbst durchführen können.
- ! — Warnsymbol; befolgen Sie unbedingt den angegebenen Hinweis!
- i — Information; hier werden Ihnen zusätzliche Informationen geliefert.
- 1 — Basisaufgaben
- 2 — Fortgeschrittene Aufgaben; zu diesen Aufgaben finden Sie bis zu drei + Lösungshinweise auf den angegebenen Seiten im Anhang.
- 1* — Aufgaben, die über den Lehrplan hinaus gehen.
- MC — Mediencode; die angegebene Nummer können Sie unter www.ccbuchner.de im Suchfeld eingeben (z. B. Eingabe „67051-09“) und gelangen so zu weiteren Materialien.



11 Physik

Herausgegeben von
Rainer Dietrich, Frank Finkenberg, Rüdiger Janner und
Martin Schalk

Bearbeitet von
Rainer Dietrich
Susanne Dührkoop
Christian Fauser
Frank Finkenberg
Günter Gerstmeier
Rüdiger Janner
Wolfgang Kellner
Eva-Maria Meyer
Wolfgang Riffelmacher
Martin Schalk
Ruprecht Steinhübl

C.C.Buchner

Physik 11

Gymnasium Bayern Sek II
Herausgegeben von Rainer Dietrich, Frank Finkenberg, Rüdiger Janner und Martin Schalk

Bearbeitet von Rainer Dietrich, Susanne Dührkoop, Christian Fauser, Frank Finkenberg, Günter Gerstmeier, Rüdiger Janner, Wolfgang Kellner, Eva-Maria Meyer, Wolfgang Riffelmacher, Martin Schalk und Ruprecht Steinhübl unter Mitarbeit der Verlagsredaktion

Zu diesem Lehrwerk sind erhältlich:
· Digitales Lehrermaterial: **click & teach** Einzellizenz, Bestell-Nr. 670611
· Digitales Lehrermaterial: **click & teach** Box (Karte mit Freischaltcode), ISBN 978-3-661-67061-4
Weitere Lizenzformen (Einzellizenz flex, Kollegiumslizenz) und Materialien unter www.ccbuchner.de.

Dieser Titel ist auch als digitale Ausgabe **click & study** unter www.ccbuchner.de erhältlich.

Die enthaltenen Links verweisen auf digitale Inhalte, die der Verlag bei verlagsseitigen Angeboten in eigener Verantwortung zur Verfügung stellt. Links auf Angebote Dritter wurden nach den gleichen Qualitätskriterien wie die verlagsseitigen Angebote ausgewählt und bei Erstellung des Lernmittels sorgfältig geprüft. Für spätere Änderungen der verknüpften Inhalte kann keine Verantwortung übernommen werden.

An keiner Stelle im Schülerbuch dürfen Eintragungen vorgenommen werden.

1. Auflage, 1. Druck 2023
Alle Drucke dieser Auflage sind, weil untereinander unverändert, nebeneinander benutzbar.
Dieses Werk folgt der reformierten Rechtschreibung und Zeichensetzung. Ausnahmen bilden Texte, bei denen künstlerische, philologische oder lizenzrechtliche Gründe einer Änderung entgegenstehen.

Redaktion: Frederik Töpfer
Illustrationen: Artegraph GbR, Rainer Götze, Berlin
Umschlag: Wildner + Designer GmbH, Fürth
Layout und Satz: mgo360 GmbH & Co. KG, Bamberg
Druck und Bindung: Firmengruppe Appl, aprinta Druck, Wemding

www.ccbuchner.de

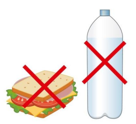
ISBN 978-3-661-**67051**-5

B Schwingungen und Wellen

Verhalten in Fachräumen der Physik

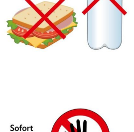


1. Fachräume dürfen nur bei Anwesenheit einer Lehrkraft betreten werden.



2. In Fachräumen darf weder gegessen noch getrunken werden.

3. Schultaschen und Jacken sind so abzulegen, dass niemand darüber stolpert bzw. genügend Platz zum Vorbeigehen ist.



4. Geräte und Versuchsaufbauten (z. B. am Experimentiertisch vorne) dürfen ohne Erlaubnis der Lehrkraft keinesfalls berührt werden, auch wenn die Situation völlig ungefährlich erscheint.

5. Die elektrische Energie- und Gasversorgung darf eigenmächtig nicht bedient werden.



6. Beschädigte Steckdosen, Stecker, Geräte oder Kabel sowie offene Gashähne, Gasgeruch oder andere Gefahrenstellen sind sofort der Lehrerin oder dem Lehrer zu melden.

7. Im Gefahrenfall einen Not-Aus-Schalter betätigen; Standorte und die Bedienung von Not-Aus-Schaltern sind bekannt.

8. Wer anderen im Gefahrenfall hilft, achtet auf seine eigene Sicherheit.



9. Die Standorte ...
   der Feuerlöscheinrichtungen,
   des Erste-Hilfe-Materials und
   des nächsten Telefons (im Notfall ggf. auch Handy nutzen) sind bekannt.
   Notrufnummern 112 (integrierte Leitstelle) oder 110 (Polizei)
   (beim Schultelefon muss erst 0 gewählt werden und dann 112 bzw. 110).

10. Bei einem Feueralarm sind die Verhaltensregeln zu beachten; der Fluchtweg ist bekannt.

Verhalten beim Experimentieren



1. Beim Experimentieren dürfen Mappen und Kleidungsstücke nicht auf dem Experimentiertisch abgelegt werden. Es ist darauf zu achten, dass es keine Stolperfallen (z. B. Schultaschen) gibt und genügend Platz zum Arbeiten ist.

2. Die Schülerinnen und Schüler befolgen die Arbeitsanweisungen der Lehrkraft gewissenhaft. Versuchsanleitungen sind sorgfältig zu lesen. Bei Unklarheiten fragen die Schülerinnen und Schüler die Lehrkraft.

3. Die von der Lehrkraft angeordneten Schutzmaßnahmen sind zu befolgen (u. a. bei offenen Flammen, erwärmten Flüssigkeiten oder bei elektrischer Gefährdung), um sich selbst und andere Personen nicht zu gefährden.

4. Beschädigte Steckdosen, Stecker, Geräte oder Kabel sowie offene Gashähne, Gasgeruch oder andere Gefahrenstellen sind sofort der Lehrerin oder dem Lehrer zu melden. Geräte sind sorgfältig zu handhaben.



5. Ohne die Erlaubnis der Lehrkraft (ggf. Lehrkraft zum eigenen Experimentierplatz holen und um Kontrolle des Aufbaus bitten)
   - dürfen keine Geräte eingeschaltet werden,
   - darf die Arbeit mit den Versuchsmaterialien nicht begonnen werden.

6. Eigenmächtig „mal etwas ausprobieren“ ist ohne Erlaubnis der Lehrerin oder des Lehrers untersagt.

7. Im Gefahrenfall oder bei einem Unfall ist sofort die Lehrkraft zu rufen.



8. Nach Beendigung des Versuchs
   - wird dieser ordnungsgemäß abgebaut (z. B. Elektroschalter ausschalten),
   - werden Versuchsmaterialien an ihren Platz zurückgebracht,
   - wird der Arbeitsplatz falls nötig gesäubert; ggf. auch die Hände gewaschen.

9. Aus Sicherheitsgründen dürfen Experimente, die in der Schule gezeigt oder unter Aufsicht der Lehrkraft von Schülerinnen und Schülern durchgeführt wurden, nicht gedankenlos oder leichtsinnig zu Hause wiederholt werden. Bei Heimexperimenten ist auch auf Sicherheit zu achten.

A \ Kreisbewegungen

Bahngeschwindigkeit Inertialsystem
Koordinatendarstellung Frequenz Umlaufdauer
Zentripetalkraft Winkelgeschwindigkeit
Zentrifugalkraft
Haftreibungszahl Hertz
Überhöhung Kleinwinkelnäherung
Zentrifuge Scheinkraft deduktive Herleitung
Spurweite
Fliehkraftregler Gedankenexperiment
Gravitationskraft Gravitationskonstante
Scheinkraft geostationärer Satellit



Sie können in diesem Kapitel entdecken …

- wie sich durch Analogiebetrachtungen die Größen der geradlinigen Bewegung auf die Kreisbewegung übertragen lassen und wie Kreisbewegungen zustande kommen.
- wie die Formel für die Zentripetalkraft hergeleitet wird und wie sich die Zentripetalkraft von der Zentrifugalkraft abgrenzen lässt.
- wie Sie ein geeignetes Experiment zur Überprüfung des Terms für die Zentripetalkraft planen. Dieses Experiment werden Sie unter Verwendung von elektronischen Sensoren durchführen und über die Genauigkeit der Messungen reflektieren.
- wie Sie quantitative Betrachtungen zu Kreisbewegungen in Alltag und Technik durchführen, die jeweilige Zentripetalkraft identifizieren und kritische Situationen im Straßenverkehr auf der Grundlage physikalischer Gegebenheiten bewerten.
- wie Sie mithilfe des Gravitationsgesetzes die Bewegung von Himmelskörpern und Satelliten als Kreisbewegung modellieren.

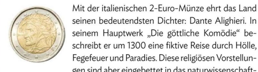




1 Kreisbewegungen

Versuche und Materialien zu Kapitel 1.1

M1 Einstieg: Ein mittelalterliches Weltbild



Mit der italienischen 2-Euro-Münze ehrt das Land seinen bedeutendsten Dichter: Dante Alighieri. In seinem Hauptwerk „Die göttliche Komödie“ beschreibt er um 1300 eine fiktive Reise durch Hölle, Fegefeuer und Paradies. Diese religiösen Vorstellungen sind aber eingebettet in das naturwissenschaftliche Weltbild zu seiner Zeit. Und obwohl Dante kein Naturwissenschaftler war, hat er doch alle wesentlichen Erkenntnisse der damaligen Astronomie berücksichtigt. Eine geometrische Figur wiederholt sich dabei immer wieder: der Kreis.

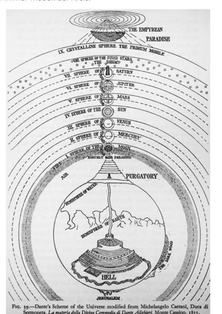


FIG. 39.—Dante's Scheme of the Universe modified from Michelangelo Caetani, Duca di Sermoneta, *La materia della Divina Commedia di Dante Alighieri*, Monte Cassino, 1855.

Die Hölle besteht aus kreisförmigen Stufen, ebenso der Läuterungsberg. Um die Erde bewegen sich die Himmelskörper auf Kreisbahnen

Arbeitsauftrag

a) Recherchieren Sie die Biografie Dantes und seine Bedeutung für die Entwicklung der italienischen Sprache.
b) Die Zeichnung links soll die literarische Beschreibung anschaulicher machen. Nennen Sie ihre wesentlichen Bestandteile und erklären Sie, ob sie in einem heutigen wissenschaftlichen Weltbild noch vorkommen könnten. Recherchieren Sie ggf. unbekannte Begriffe.
c) Bereits in der Antike wurden der Kreis und die Kugel als besonders perfekte und „göttliche“ geometrische Formen angesehen. Finden Sie mögliche Gründe für diese Sonderstellung.
d) Die Anordnung der Himmelskörper folgt einem bestimmten Muster. Begründen Sie diese Reihenfolge. Berücksichtigen Sie geeignete astronomische Daten.
e) Der „Kristallhimmel“ („Crystalline Sphere“) in der Darstellung links ist nötig, um die Bewegung auf alle anderen Himmelskörper zu übertragen. Diskutieren Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu unserem heutigen Konzept der Energie.

und auch die Engel kreisen um Gott. Bemerkenswerterweise wird auch damals schon die Erde als Kugel angesehen – jedenfalls von Menschen einer gewissen Bildungsstufe. Viele unserer heutigen Mythen über das „finstere Mittelalter“ halten also einer näheren Betrachtung nicht stand!



f) *„Die beiden sind im siebten Himmel!“* Beschreiben Sie die Bedeutung dieser Sprechweise und erklären Sie ihre Herkunft aus dem mittelalterlichen Weltbild, wie es Dante beschrieben hat.

g) Der Kurzfilm „Powers of Ten“ (1977) von Charles und Ray Eames unternimmt ebenfalls eine Reise durch das gesamte Weltall und orientiert sich dabei an Stufen von Größenordnungen. Suchen Sie nach dem Film (oder einer Beschreibung davon) im Internet und beschreiben Sie Parallelen zu Dantes „Commedia“. Beachten Sie dabei besonders die Stellung des Menschen im Weltall.

Versuche und Materialien zu Kapitel 1.2

M2 Lernaufgabe: Bahn- und Winkelgeschwindigkeit

In einem Getriebe greifen die Zähne der einzelnen Zahnräder ineinander. Folglich legen die Zähne auf den angrenzenden Zahnrädern in der gleichen Zeit Δt eine gleiche Strecke Δx zurück. Diese Geschwindigkeit $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ nennt man *Bahngeschwindigkeit*. Unterschiedlich große Zahnräder besitzen jedoch unterschiedliche Drehfrequenzen. Verbindet man einen Zahn des Zahnrades mit dem Mittelpunkt und betrachtet den Winkel $\Delta\varphi$, den diese Strecke mit einer festen waagrechten Strecke bildet, so verändert sich dieser Winkel bei der Drehbewegung in der Zeitspanne Δt. Damit lässt sich eine weitere Geschwindigkeit definieren, die *Winkelgeschwindigkeit* $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$. Sie ist bei einer hohen Drehfrequenz größer als bei einer niedrigen Drehfrequenz.



Arbeitsauftrag

a) Begründen Sie, dass die Winkelgeschwindigkeit des großen Zahnrads sich von der der kleinen Zahnräder unterscheidet, obwohl alle Zahnräder die gleiche Bahngeschwindigkeit besitzen.

b) Beschreiben Sie, wie die Winkelgeschwindigkeit eines einzelnen Zahnrads bei einer konstanten Bahngeschwindigkeit von seinem Durchmesser abhängt.

c) Das große Zahnrad im Foto dreht sich fünfmal je Sekunde. Bestimmen Sie die Drehfrequenz eines der kleinen Zahnräder.

Der Betrag der Geschwindigkeit wird in $\frac{m}{s}$ oder in $\frac{km}{h}$ angegeben.
Es gilt: $1{,}0\,\frac{m}{s} = 3{,}6\,\frac{km}{h}$

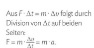
Geschwindigkeit und Krafteinwirkung



Um die Bewegung eines Körpers exakt zu beschreiben, ist es nötig, neben dem Betrag auch die Richtung der Geschwindigkeit anzugeben. Um dies zu verdeutlichen, wird die Geschwindigkeit in der Physik als Geschwindigkeitspfeil $\vec{v}$ dargestellt. Die Richtung des Pfeils zeigt in Bewegungsrichtung, die Länge des Pfeils ist eine Maß für den Betrag der Geschwindigkeit. Der Rodler in B1 bewegt sich mit einem bestimmten Geschwindigkeitsbetrag immer in Richtung der Rodelbahn.



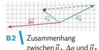
B1 Rodler auf einer Rodelbahn.



Aus $F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$ folgt durch Division von Δt auf beiden Seiten:
$F = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \cdot a$.

Sprechen wir von einer Änderung der Geschwindigkeit, so kann dies eine Änderung des Betrags der Geschwindigkeit und/oder eine Änderung der Richtung der Geschwindigkeit bedeuten. Für eine Geschwindigkeitsänderung ist eine Kraft nötig. Dies ist die Aussage des zweiten Newtonschen Gesetzes:

$$F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v, \text{ bzw. in Pfeilschreibweise } \vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}.$$



B2 Zusammenhang zwischen $\vec{v}_A$, Δv und $\vec{v}_E$

Die Kraft $\vec{F}$ zeigt dabei stets in Richtung der Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$. Soll sich der Betrag einer Geschwindigkeit ändern, muss es folglich eine Kraftkomponente geben, die in oder entgegen der Bewegungsrichtung zeigt.
Soll sich die Richtung einer Bewegung ändern, so muss es eine Kraftkomponente geben, die in die entsprechende Richtungsänderung zeigt. Stellt $\vec{v}_A$ den Geschwindigkeitspfeil vor der Krafteinwirkung und $\vec{v}_E$ den Geschwindigkeitspfeil nach der Krafteinwirkung dar, so gilt (vgl. B2):

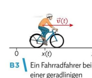
$$\vec{v}_E = \vec{v}_A + \Delta\vec{v}$$

Das zweite Newtonsche Gesetz hängt unmittelbar mit dem Trägheitssatz zusammen, der auch als erstes Newtonsches Gesetz bezeichnet wird:

Wirkt auf einen Körper keine Kraft oder ist die Summe der auf ihn wirkenden Kräfte gleich null, so bleibt der Körper entweder in Ruhe oder er bewegt sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit.

Geradlinige Bewegungen

Ändert ein Körper seine Bewegungsrichtung nicht, so spricht man von einer geradlinigen oder linearen Bewegung. Es wirkt folglich keine Kraft, die nicht parallel zur Bewegungsrichtung zeigt. Aus praktischen Gründen legt man das Koordinatensystem so an, dass die Bewegung entlang der x-Achse stattfindet. Für die Angabe des Orts der Bewegung reicht deshalb eine Koordinate $x(t)$ aus. Befindet sich der Körper zum Zeitpunkt $t = 0$ im Ursprung des Koordinatensystems ($x(0) = 0$), so gibt der Ort $x(t)$ gleichzeitig die in der Zeitspanne Δt zurückgelegte Strecke Δx an.
Man unterscheidet bei den geradlinigen Bewegungen zwischen Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit und beschleunigten Bewegungen. Und im zweiten Fall unterscheidet man nochmal zwischen einer Bewegung mit konstanter Beschleunigung und einer Bewegung mit nicht-konstanter Beschleunigung.



B3 Ein Fahrradfahrer bei einer geradlinigen Bewegung: Zum Zeitpunkt t befindet sich der Radfahrer am Ort $x(t)$ und bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v(t)$ nach rechts.

Überblick

Nachfolgend soll für alle Bewegungen gelten: $x(t = 0) = 0$. Für die beschleunigte Bewegung soll außerdem die Beschleunigung a konstant sein und $v(t = 0) = 0$ gelten.

	Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit	**Beschleunigte Bewegung**
Beschleunigung	$a = 0$	$a(t) = a$
Geschwindigkeit	$v(t) = v_0$	$v(t) = a \cdot t$
Ort	$x(t) = v_0 \cdot t$	$x(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$
Krafteinwirkung parallel zur Bewegungsrichtung	Keine Krafteinwirkung entlang der Bewegungsrichtung	Krafteinwirkung in Bewegungsrichtung $\Leftrightarrow v$ nimmt zu; Krafteinwirkung entgegen der Bewegungsrichtung $\Leftrightarrow v$ nimmt ab

v_0 ist die konstante Geschwindigkeit der Bewegung, sie bleibt also während der gesamten Bewegung unverändert.

Die Beschleunigung ist die Geschwindigkeitsänderung Δv in der Zeitspanne Δt und wird in der Einheit $1\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ angegeben. Nimmt die Geschwindigkeit zu, so ist a positiv. Nimmt die Geschwindigkeit ab, ist a negativ und heißt auch „Verzögerung". Bei beschleunigten Bewegungen erhält man durch Elimination der Zeit t folgenden Zusammenhang zwischen v und x: $v^2 = 2 \cdot a \cdot x$. Diese Beziehung kann für Berechnungen sehr nützlich sein.

Arbeitsaufträge

**1 ** Die beiden oben im Überblick genannten geradlinigen Bewegungen lassen sich mithilfe von Bewegungsdiagrammen veranschaulichen.
Zeichnen Sie die entsprechenden t-a-, t-v- und t-x-Diagramme. Erläutern Sie die Informationen, die man den Diagrammen zusätzlich noch entnehmen kann.

**2 ** In der obigen Tabelle sind die Bewegungsgleichungen für die Angangsbedingung $x(t = 0) = 0$ bzw. $v(t = 0) = 0$ genannt.
Stellen Sie die Bewegungsgleichungen für die Anfangsbedingungen $v(t = 0) = v_0$ und $x(t = 0) = x_0$ auf. Zeichnen Sie die zugehörigen t-v- und t-x-Diagramme und erläutern Sie diese Diagramme.

**3 ** Sie fahren mit $90\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$ und wollen, ohne zu beschleunigen, einen PKW überholen, der 20 m vor Ihnen mit $72\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$ fährt. Beide Fahrzeuge sind 5,0 m lang und aus Sicherheitsgründen scheren Sie auch 20 m vor dem anderen PKW wieder ein.
a) Berechnen Sie die Dauer des Überholvorgangs und die Strecke, die beide PKW dabei zurücklegen.
b) Begründen Sie, wo Sie für ein t-x-Diagramm den Nullpunkt Ihres Koordinatensystems legen.
c) Stellen Sie den Überholvorgang in einem t-x-Diagramm eines außenstehenden Beobachters dar.

**4 ** Fährt man mit konstant $100\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$, kann man eine Strecke von 400 km in 4,0 Stunden zurücklegen.
Zeigen Sie allgemein, dass die Fahrzeit länger wird, wenn man auf der ersten Hälfte der Strecke die Geschwindigkeit um einen bestimmten Betrag verringert und um denselben Betrag auf der zweiten Hälfte wieder vergrößert.

**5 ** Ein Rennwagen (m = 800 kg) beschleunigt konstant in 2,5 s von 0 auf $100\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$.
Berechnen Sie die Kraft, die der Motor aufbringen muss, sowie die beim Beschleunigungsvorgang zurückgelegte Strecke.

**6 ** Auf Webseiten zur Führerscheinprüfung findet man für den Bremsweg s (in Metern) eines Autos mit Geschwindigkeit v folgende Faustformel: $s = (v \text{ in } \frac{\text{km}}{\text{h}} : 10)^2$
Berechnen Sie daraus an einem selbstgewählten Beispiel den Betrag der Beschleunigung a beim Bremsvorgang.



B1 Ein Kreisel als Beispiel einer Drehbewegung.

Unterscheidung: Kreisbewegung – Drehbewegung

Bewegt sich ein Körper auf einer Kreisbahn mit Radius r um einen im Bezugssystem festen Mittelpunkt M (z. B. ein Mensch in einem Karussell), spricht man von einer Kreisbewegung.

Dreht sich ein starrer Körper um eine feste Achse (z. B. ein Kreisel), spricht man hingegen von einer Drehbewegung. Betrachtet man allerdings einen Punkt auf diesem Körper, so vollführt dieser Punkt wiederum eine Kreisbewegung.

Bei beiden Bewegungen bezeichnet man die Zeitspanne für einen kompletten Umlauf als Umlaufdauer T, ihren Kehrwert $\frac{1}{T}$ als Frequenz f. Die Frequenz gibt an, wie viele Umdrehungen der Körper pro Sekunde vollführt.

Umlaufdauer einer Kreisbewegung: T	Einheit: 1 s
Frequenz einer Kreisbewegung: $f = \frac{1}{T}$	Einheit: $1\frac{1}{s} = 1\,s^{-1} = 1$ Hz = 1 Hertz

Vergleich: Geradlinige Bewegung – Kreisbewegung

Wir vergleichen im Folgenden eine geradlinige Bewegung (z. B. einen Fahrradfahrer, der geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit auf einer ebenen Straße fährt) mit einer Kreisbewegung (z. B. einem Menschen, der sich in einem Kettenkarussell mit konstanter Umlaufdauer befindet).







B2 Geradlinige Bewegung eines Radfahrers und Kreisbewegung von Personen im Kettenkarussell.

Beide Geschwindigkeiten, sowohl die Geschwindigkeit einer geradlinigen Bewegung als auch die Bahngeschwindigkeit der Kreisbewegung, besitzen die Einheit $\frac{m}{s}$.

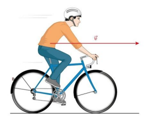
Sowohl die Person im Kettenkarussell als auch der Radfahrer legen in einer bestimmten Zeitspanne Δt eine bestimmte Strecke Δx zurück. Beide besitzen damit eine (konstante) Geschwindigkeit v, die sich mit $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ berechnen lässt.

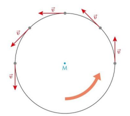
Bei der Kreisbewegung nennt man diese Geschwindigkeit die Bahngeschwindigkeit des Körpers. Δx entspricht dabei dem Kreisbogen b, den der Körper in der Zeitspanne Δt zurücklegt. Für einen gesamten Umfang $2\pi r$ benötigt der Körper folglich die Umlaufdauer T.

Die Bahngeschwindigkeit v ist die Geschwindigkeit, mit der sich der Körper auf der Kreisbahn bewegt. Für ihren Betrag gilt: $v = \frac{b}{\Delta t} = \frac{2\pi r}{T}$

Weiter außen im Kettenkarussell sitzende Personen bewegen sich mit einer größeren Bahngeschwindigkeit als Personen, die weiter innen sitzen. Befindet man sich genau im Mittelpunkt der Kreisbewegung, so ist die Bahngeschwindigkeit gleich null.

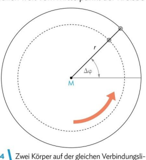
Betrachten wir den Geschwindigkeitspfeil $\vec{v}$ bei beiden Bewegungen, so stellen wir fest, dass dieser bei der geradlinigen Bewegung immer in die gleiche Richtung zeigt, während sich die Richtung von $\vec{v}$ bei der Kreisbewegung dauernd ändert (vgl. B3).





B3 Geschwindigkeitspfeil bei einer geradlinigen Bewegung und bei einer Kreisbewegung.

Nach Newtons Trägheitssatz bleibt ein Körper in Ruhe oder er bewegt sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit, solange keine Kraft auf ihn wirkt. Damit sich die Richtung der Bahngeschwindigkeit bei einer Kreisbewegung dauernd ändert, muss folglich – im Gegensatz zur geradlinigen Bewegung – stets eine Kraft auf den Körper wirken. Diese Kraft heißt Zentripetalkraft und wird in Kapitel 2 genauer behandelt.
Betrachten wir nun zwei Körper, die unterschiedlich weit vom Mittelpunkt der Kreisbewegung entfernt sind, jedoch die gleiche Umlaufdauer T besitzen (vgl. B4). Beim Beispiel des Kettenkarussells wären dies zwei Personen, die unterschiedlich weit vom Mittelpunkt entfernt sitzen. Da die Radien der beiden Kreisbewegungen unterschiedlich sind, legen die Personen in der Zeit Δt zwar verschieden lange Strecken zurück, der Winkel $\Delta\varphi$, um den sich dabei die Verbindungslinie zum Mittelpunkt im Zeitabschnitt Δt dreht, ist dennoch für beide gleich. Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung dreht sich der Radius r in der gleichen Zeit Δt um den gleichen Winkel $\Delta\varphi$ weiter.



B4 Zwei Körper auf der gleichen Verbindungslinie und gleichem $\Delta\varphi$.

Somit kann man bei einer Kreisbewegung neben der Bahngeschwindigkeit v zusätzlich noch eine Winkelgeschwindigkeit ω definieren. Der Winkel $\Delta\varphi$ wird dabei im Bogenmaß angegeben, sodass die Einheit der Winkelgeschwindigkeit $\frac{1}{s}$ lautet. Beim Beispiel in B4 haben beide Körper die gleiche Winkelgeschwindigkeit, aber verschiedene Bahngeschwindigkeiten.

Die Umformung ergibt sich aus der Betrachtung eines vollen Umlaufs: $\Delta\varphi = 2\pi$ und $\Delta t = T$.

Winkelgeschwindigkeit einer Kreisbewegung: $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$

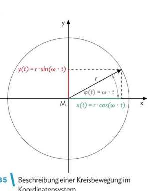
Einheit: $1\frac{1}{s} = 1\,s^{-1}$

Damit gilt für den Zusammenhang zwischen Winkel- und Bahngeschwindigkeit:

$v = \frac{2\pi}{T} \cdot r = \omega \cdot r$

Beschreibung im Koordinatensystem

Im Gegensatz zur geradlinigen Bewegung, bei der für die Angabe des Orts $x(t)$ zum Zeitpunkt t eine Koordinate genügt, stellt die Kreisbewegung eine zweidimensionale Bewegung dar. Für die Angabe des Ortes zum Zeitpunkt t benötigt man folglich eine x- und eine y-Koordinate. Das Koordinatensystem wird dabei so über die Bewegung gelegt, dass der Mittelpunkt M der Kreisbewegung im Ursprung des Koordinatensystems liegt und dass sich der Körper zum Zeitpunkt $t = 0$ auf der x-Achse, also im Punkt $(r|0)$, befindet (vgl. B5). Der Winkel $\varphi(t) = \omega \cdot t$ liegt somit zwischen der x-Achse und dem Radius r der Kreisbewegung. Die x- und y-Koordinate des Körpers zum Zeitpunkt t sind die beiden Katheten des rechtwinkligen Dreiecks mit Hypotenuse r.

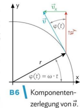


B5 Beschreibung einer Kreisbewegung im Koordinatensystem.

Die Angabe von r und φ bezeichnet man als Polarkoordinaten des Punktes.

> Die Koordinatendarstellung eines Körpers auf einer Kreisbahn mit Radius r lautet:
> $x(t) = r \cdot \cos(\omega t)$; $y(t) = r \cdot \sin(\omega t)$

Auch die Bahngeschwindigkeit v ist eine zweidimensionale Größe. In B6 ist der Pfeil von v tangential an die Kreisbahn gezeichnet und in die entsprechenden Komponenten in x- und y-Richtung zerlegt. Der Winkel φ befindet sich ebenso im oberen, rechtwinkligen Dreieck. Damit lässt sich die Bahngeschwindigkeit v wiederum mithilfe des Sinus und des Kosinus in die x- und y-Komponente zerlegen.



B6 Komponentenzerlegung von $\vec{v}$.

> Die x- und die y-Komponenten der Bahngeschwindigkeit v berechnen sich zu:
> $v_x(t) = v \cdot \sin(\omega t)$; $v_y(t) = v \cdot \cos(\omega t)$

Zusammenfassung: geradlinige Bewegung – Kreisbewegung

Geradlinige Bewegung	Kreisbewegung
Geschwindigkeit $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$	Bahngeschwindigkeit $v = \frac{2\pi r}{T}$ Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T}$
Weg: geradlinige Strecke Δx	Weg: Kreisbogen $b = r \cdot \Delta\varphi$
Koordinatendarstellung des Orts: $x(t) = v \cdot t$	Koordinatendarstellung des Orts: $x(t) = r\cos(\omega t)$; $y(t) = r\sin(\omega t)$
v = const ⇔ keine Kraft	beschleunigte Bewegung, da durch Kraftwirkung eine permanente Richtungsänderung erfolgt

Musteraufgabe

Die Rotoren einer Windkraftanlage haben einen Durchmesser von 80 m und benötigen für eine Umdrehung 5,0 s.
a) Berechnen Sie Winkel- und Bahngeschwindigkeit der Rotorspitze.
b) Begründen Sie, dass die waagrechte Komponente der Bahngeschwindigkeit im oberen Punkt maximal und gleich der Bahngeschwindigkeit ist.

Lösung

a) $\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} \approx 1{,}3\ \text{s}^{-1}$

$v = \omega \cdot r = 1{,}3\ \text{s}^{-1} \cdot 40\ \text{m}$

$= 52\ \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 190\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$

b) Im oberen Punkt ist die vertikale Komponente v_y gleich Null, da die Bahngeschwindigkeit dort nur horizontal verläuft, vgl. B3 auf S. 17. Die waagrechte Komponente v_x ist daher maximal. Der Winkel $\Delta\varphi$ beträgt $\frac{\pi}{2}$, es gilt also:

$v_x = v \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = v \cdot 1 = v$

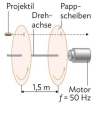
Arbeitsaufträge

**1 ** Ein PKW fährt mit 144 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ auf der Autobahn. Der Reifen mit der Aufschrift 215/55 R 16 besitzt einen Durchmesser von 64,3 cm.
a) Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit des Autoreifens.
b) Bestimmen Sie die Bahngeschwindigkeit der Ventilkappe, die 5 cm innerhalb vom Rand der 16-Zoll-Felge sitzt.
c) Ermitteln Sie die Zahl der Reifenumdrehungen auf einer 10 km langen Autofahrt.

**2 ** Geben Sie begründet und ohne Rechnung das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten von Stunden-, Minuten- und Sekundenzeiger einer Uhr an.

**3 ** Das abgebildete Tonband wird mit konstanter Geschwindigkeit von 9,5 $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ von der Spule abgewickelt.
a) Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit der Spule mit 18 cm Durchmesser zu Beginn des Abwickelns.
b) Ermitteln Sie den Prozentsatz, um den die Winkelgeschwindigkeit bis zum Ende (r = 3,0 cm) zugenommen hat.
c) Entscheiden Sie, ob Sie in einem r-ω-Diagramm Ihre beiden berechneten Werte durch eine Gerade verbinden dürfen. Begründen Sie Ihre Entscheidung.

**4 ** Um die Geschwindigkeit einer Gewehrkugel zu bestimmen, schießt man auf zwei mit einer sich drehenden Stange (Drehfrequenz f = 50 Hz) verbundene Scheiben (Abstand 1,5 m). Die beiden Einschusslöcher sind um einen Winkel von 36° versetzt.



Bestimmen Sie die Geschwindigkeit der Gewehrkugel und diskutieren Sie die Eindeutigkeit des Ergebnisses.

**5 ** Die Magnetscheiben einer Festplatte rotieren mit 7200 Umdrehungen pro Minute.
Ermitteln Sie die Bahngeschwindigkeit in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ eines Punktes am Rand, der sich in 4,5 cm Entfernung vom Mittelpunkt befindet.

**6 ** Die Erde (r_E = 6370 km) dreht sich in etwa 24 Stunden um ihre eigene Achse.
a) Erklären Sie, welche Orte auf der Erde eine identische Bahn- und welche Orte eine identische Winkelgeschwindigkeit aufweisen.
b) Recherchieren Sie für Ihren Heimatort die geographische Lage und berechnen Sie damit die Bahngeschwindigkeit einer dort stehenden Person.

Hilfestellung auf Seite 210-212

2 Zentripetalkraft

Versuche und Materialien zu Kapitel 2.1

M1 Lernaufgabe: Physik auf dem Jahrmarkt - Zentripetalkraft



Auf dem Jahrmarkt gibt es zahlreiche Fahrgeschäfte, deren rasante Bewegungen vielen Freude bereiten. Das „Gefühl im Bauch", das dabei ausgelöst wird, ist auf die Kräfte zurückzuführen, die bei den Beschleunigungen wirken. Ein typisches Fahrgeschäft ist oben abgebildet: Die Fahrersitze, in dem Fall die Pferde, befinden sich auf einer Scheibe, die sich mal mehr, mal weniger schnell im Kreis dreht.

Wären die Pferde nicht mit der Drehscheibe verbunden, so würden die Fahrgäste tangential zur Drehrichtung vom Karussell stürzen. Da das aber nicht passiert, muss eine Kraft wirken, die das verhindert. Diese Kraft, die die Fahrgäste in ihrer Position hält, wird als Zentripetalkraft bezeichnet. Sie wirkt immer dann, wenn sich ein Körper auf einer Kreisbahn bewegt; ihre Ursache kann aber verschiedene Gründe haben.

Eine ähnliche Situation gibt es beispielsweise bei einer Achterbahn, die eine Kurve fährt. Normalerweise würde der Wagen tangential zur Bewegungsrichtung die Schiene verlassen, wenn er nicht von einer Vorrichtung davon abgehalten würde. Die Zentripetalkraft wird hier also durch die Halterung hervorgerufen.



Arbeitsauftrag

a) Beschreiben Sie mindestens drei Alltagssituationen, bei denen die Zentripetalkraft wirken muss. Grenzen Sie diese Situationen zu Bewegungen ab, bei denen keine Zentripetalkraft wirkt.

b) Stellen Sie eine Vermutung darüber auf, in welche Richtung die Zentripetalkraft beim Karussell bzw. der Achterbahn zeigen muss. Begründen Sie diese Vermutung.

c) Stellen Sie auf Basis Ihrer Kenntnisse über die Kreisbewegungen aus Kapitel 1 sowie der Newtonschen Gesetze eine Vermutung darüber auf, von welchen physikalischen Größen der Betrag der Zentripetalkraft abhängt.

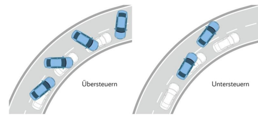
d) Nutzen Sie eine Simulation, um diese Abhängigkeiten zu überprüfen. Sie können dafür z. B. den Mediencode verwenden.

MC 67051-01

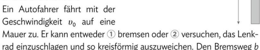
e) Erinnern Sie sich an Situationen, bei denen Sie durch eine Kurvenfahrt (Karussell, Auto, ...) eine Kraft gespürt haben. Tragen Sie in eine Skizze der Fahrt die Richtung dieser Kraft ein. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem aus b). Diskutieren Sie in der Klasse darüber, ob sich daraus ein Widerspruch ergibt.

Versuche und Materialien zu Kapitel 2.4

M2 Lernaufgabe: Fahrphysik



Die Kurvenfahrt eines Autos ist nur möglich, wenn die Haftreibungskraft der Reifen als Zentripetalkraft zur Kurvenmitte hin wirkt.
Beim Untersteuern (siehe rechtes Auto im Bild) verlieren die Vorderräder die Bodenhaftung, das Fahrzeug fährt sozusagen geradeaus weiter und „fliegt" aus der Kurve.
Beim Übersteuern (siehe linkes Auto im Bild) verlieren die Hinterräder die Bodenhaftung, das Heck des Fahrzeugs bricht zum Kurvenrand hin aus.
Neuere Fahrzeuge besitzen Assistenzsysteme wie beispielsweise das ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm), das durch gezieltes Abbremsen einzelner Räder dieses Verhalten eines Fahrzeugs oftmals verhindern kann. Das Übersteuern eines Autos kann dann auftreten, wenn der Fahrer zu stark einlenkt, er das Lenkrad also zu stark in Richtung Kurvenmitte dreht. Betrachten wir eine solche Situation:



Ein Autofahrer fährt mit der Geschwindigkeit v_0 auf eine Mauer zu. Er kann entweder ① bremsen oder ② versuchen, das Lenkrad einzuschlagen und so kreisförmig auszuweichen. Den Bremsweg b für Möglichkeit ① berechnen wir mithilfe der Bewegungsgleichung $x(t) = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$. Mittels $v_0 = a \cdot t_b$ erhalten wir $b = x(t_b) = \frac{v_0^2}{2a}$ (a ist dabei der Betrag der Beschleunigung beim Bremsen; t_b die benötigte Zeit zum Bremsen).

Unter der Annahme, dass die Zentripetalbeschleunigung betragsmäßig gleich der Beschleunigung beim Bremsen ist (was sich letztlich mit der Haftreibungskraft begründen lässt), berechnet sich der Kurvenradius zu $r = \frac{v_0^2}{a}$, also dem doppelten Bremsweg. Versucht der Autofahrer jedoch stärker einzulenken, wird sein Fahrzeug übersteuern, das Heck also ausbrechen und seitlich gegen die Mauer stoßen.

Arbeitsauftrag

a) Leiten Sie die im Text angegebene Formel für den Kurvenradius *r* her. Diskutieren Sie die Folgerungen, die sich aus dem Vergleich zwischen den Gleichungen für Bremsweg und Kurvenradius ergeben.

b) In der theoretischen Führerscheinprüfung werden folgende Fragen gestellt:
① *Wodurch wird die Größe der Fliehkraft in Kurven beeinflusst?*
② *Was erhöht die Gefahr, bei schneller Fahrt aus der Kurve zu „fliegen"?*
③ *Sie befahren eine Kurve einmal mit 30 $\frac{km}{h}$, eine anderes Mal mit 60 $\frac{km}{h}$. Wie verändert sich dabei die Fliehkraft?*
Erstellen Sie für einen Fahrschüler einen physikalisch fundierten Beitrag (vgl. auch Methode auf S. 33 und S. 100), der es ihm erlaubt, nach dessen Durcharbeitung die obigen Fragen zu beantworten und aus den jeweils vorgegebenen Antwortmöglichkeiten die Richtigen anzukreuzen.
Gehen Sie dabei auch auf Fragen des richtigen Verhaltens im Straßenverkehr und das Erkennen von Gefahren ein. *Hinweis:* „Fliehkraft" ist umgangssprachlich für „Zentripetalkraft".

Richtung der Zentripetalkraft

Im vorherigen Kapitel haben wir gesehen, dass es sich bei einer Kreisbewegung mit konstantem Betrag der Winkel- und Bahngeschwindigkeit um eine beschleunigte Bewegung handelt, da sich die Richtung der Bahngeschwindigkeit permanent ändert.
Da auch für eine Kreisbewegung das zweite Newtonsche Gesetz $F = m \cdot a$ gelten muss, wirkt stets eine Kraft auf den Körper. Diese Kraft ist die Ursache für die Kreisbewegung und wird als Zentripetalkraft bezeichnet, vgl. auch M1. Bei jeder Kreisbewegung wirkt also zwangsläufig eine Zentripetalkraft, die Ursache dafür hängt aber von der jeweiligen Situation ab: Bei der Kurvenfahrt eines Autos wirkt die Haftreibungskraft auf die Reifen als Zentripetalkraft, bei einer Achterbahnfahrt ist die von den Schienen auf den Achterbahnwagen ausgeübte Kraft die Zentripetalkraft.
Wie Sie aus Kapitel 1.1 wissen, ändert sich der Geschwindigkeitsbetrag einer Bewegung nur dann, wenn die auf den Körper wirkende Kraft eine Komponente in oder entgegen der Bewegungsrichtung hat. Bei der Kreisbewegung ändert sich der Geschwindigkeitsbetrag jedoch nicht, sondern nur die Richtung der Geschwindigkeit. Die Zentripetalkraft kann daher keine Komponente in oder entgegen der Bewegungsrichtung haben. Folglich muss sie senkrecht zur Bewegungsrichtung wirken; die Zentripetalkraft ist daher zum Mittelpunkt der Kreisbewegung hin gerichtet.

B1 Geschwindigkeit $\vec{v}$ und Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$ bei einer Kreisbewegung.

Die Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$ ist die Ursache für eine Kreisbewegung und zeigt immer vom Körper aus in Richtung Mittelpunkt der Kreisbewegung.

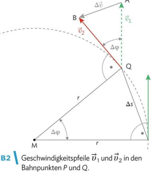
Methode

Deduktive und induktive Herleitung einer Formel

Physikalische Formeln lassen sich allgemein auf zwei Arten herleiten: Bei der *deduktiven Methode* geht man von allgemeinen Gesetzen aus und schließt daraus auf einen Spezialfall, wie auf den folgenden Seiten z. B. von den Gesetzen der Mechanik speziell auf die Kreisbewegung geschlossen wird. Es ist aber auch bei dieser Methode wichtig, die Ergebnisse mit geeigneten Experimenten zu überprüfen und zu untermauern.
Bei der *induktiven Methode* versucht man von z. B. Versuchsergebnissen auf allgemeingültige Zusammenhänge zu schließen. Sinnvollerweise stellt man vorab Hypothesen auf und versucht diese experimentell zu bestätigen oder zu widerlegen.
Beide Ansätze sind aber letztlich gleichwertig. Je nach Situation bietet sich mal die eine, mal die andere Methode an.

Zentripetalbeschleunigung

Mithilfe des zweiten Newtonschen Gesetzes können wir nun einen Ausdruck für die Zentripetalbeschleunigung herleiten, die bei einer Kreisbewegung auf den Körper wirkt. Während der Zeit Δt bewegt sich der Körper vom Punkt *P* zum Punkt Q auf einer Kreisbahn um den Mittelpunkt *M* mit dem Radius *r*, vgl. B2. Die Geschwindigkeitspfeile $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ verlaufen in *P* und Q jeweils tangential bezüglich der Kreisbahn, da sich der Körper bei Fehlen der Kraft nach dem Trägheitssatz der Mechanik geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit bewegen würde. Für kleine Winkel $\Delta\varphi$ kann man die Länge des Kreisbogens von *P* nach *Q* durch die Länge der Kreissehne Δs annähern. Eine solche Art der Näherung findet in der Physik häufig Anwendung. Die Kreisbahn wird in viele kleine, gerade Stücke zerlegt, es werden also nur kurze Zeitintervalle Δt betrachtet. Die weitere Berechnung vereinfacht sich dadurch bzw. sind manche Probleme nur auf die Art analytisch lösbar.



B2 Geschwindigkeitspfeile $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ in den Bahnpunkten *P* und *Q*.

Verschiebt man den Pfeil $\vec{v}_1$ parallel an den Punkt Q, entsteht aufgrund der konstanten Bahngeschwindigkeit und damit der gleichen Pfeillängen $v_1 = v_2 = v$ das gleichschenklige Dreieck *QAB*. Dieses ist zum gleichschenkligen Dreieck *MPQ* wegen des gleichen Winkels $\Delta\varphi$ an der Spitze ähnlich.
Folglich stehen entsprechende Seiten im selben Verhältnis:

① $\frac{\Delta s}{r} = \frac{\Delta v}{v}$

Für eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit gilt:

② $\Delta s = v \cdot \Delta t$

Für eine beschleunigte Bewegung gilt:

③ $\Delta v = a \cdot \Delta t$

Man kann nun diese drei Beziehungen vereinen zu:

$\frac{v \cdot \Delta t}{r} = \frac{a \cdot \Delta t}{v}$.

Durch Umformen und unter Berücksichtigung von $v = r \cdot \omega$ erhält man somit:

$a_{Zp} = \frac{v^2}{r} = r \cdot \omega^2$.

Damit ein Körper eine gleichförmige Kreisbewegung ausführen kann, muss auf ihn zu jeder Zeit eine zum Kreismittelpunkt hin gerichtete Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$ wirken. Dabei wirkt auf den Körper die Zentripetalbeschleunigung $\vec{a}_{Zp}$. Die Zentripetalkraft hat den konstanten Betrag $F_{Zp} = m \cdot a_{Zp} = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot r \cdot \omega^2$.

Diese Beschreibung der Kreisbahn gilt für den Beobachter der Kreisbewegung in einem ruhenden Bezugssystem, also z. B. für einen außenstehenden Beobachter eines Kindes in einem Karussell. Nicht aber für den bewegten, beschleunigten Beobachter, hier das Kind im Karussell. Wie sich die Bewegung für den mitbewegten Beobachter darstellt, wird in Kapitel 2.2 genauer untersucht.

Diese Art der Herleitung nennt sich *deduktiv*, vgl. Methode auf S. 22.

Die Näherung ist umso besser, je kleiner $\Delta\varphi$ ist.

Die Gleichheit des Winkels $\Delta\varphi$ kann man zeigen, indem man die Strecke $\overline{AQ}$ bis zur Strecke $\overline{MP}$ verlängert.
Benennt man den am Punkt Q entstehenden Winkel α, so erhält man einmal als gestreckten Winkel
$180° = \Delta\varphi + 90° + \alpha$
und einmal als Winkelsumme im entstehenden rechtwinkligen Dreieck
$180° = \Delta\varphi + 90° + \alpha$.

Die Zentripetalkraft ergibt sich also deduktiv aus dem 2. Newtonschen Gesetz.

Alternativer Herleitungsansatz

In der Physik gibt es häufig unterschiedliche Herangehensweisen, um eine Formel herzuleiten. So lässt sich auch die Zentripetalbeschleunigung mithilfe alternativer Ansätze herleiten. Solange die physikalischen Annahmen die gleichen sind und beispielsweise keine zusätzlichen Einschränkungen gemacht werden, sind alle diese Ansätze gleichwertig.

Ein alternativer Ansatz zur Herleitung der Zentripetalbeschleunigung ist in B3 dargestellt: Im kurzen Zeitintervall Δt bewegt sich der Körper in x-Richtung um $|\overline{AA'}| = |\overline{HC}| = v \cdot \Delta t$ und in y-Richtung durch die Beschleunigung um $|\overline{AH}| = \frac{1}{2} \cdot a \cdot (\Delta t)^2$.

Die rechtwinkligen Dreiecke CHA und BHC sind wegen der gleichen Winkel zueinander ähnlich.

Die Gleichheit des Winkels φ bei den Punkten A und C kann man folgendermaßen zeigen: Das Dreieck BAC besitzt aufgrund des Satzes von Thales bei C einen rechten Winkel. Benennen wir den Winkel beim Punkt A mit φ, so gilt $\varphi = 90° - \theta$. Das Dreieck BHC besitzt bei H einen rechten Winkel. Damit berechnet sich der Winkel im Punkt C zu $90° - \theta = \varphi$.

Folglich gilt: $\frac{|\overline{AH}|}{|\overline{HC}|} = \frac{|\overline{HC}|}{|\overline{HB}|}$

Umgeformt ergibt sich:

$|\overline{HC}|^2 = |\overline{AH}| \cdot |\overline{HB}|$

B3 Darstellung der Kreisbewegung für den alternativen Herleitungsansatz.

Setzt man die obigen Beziehungen ein, erhält man:

$$(v \cdot \Delta t)^2 = \left(\frac{1}{2}a(\Delta t)^2\right) \cdot \left(2r - \frac{1}{2}a(\Delta t)^2\right)$$

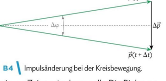
Ausgerechnet und umgeformt erhält man: $a \cdot r - \frac{a^2}{4}(\Delta t)^2 = v^2$

Der Grenzübergang $\Delta t \to 0$ liefert dann die bekannte Formel für a_{Zp}.

Hier findet also wie im ersten Lösungsansatz die Näherung statt, dass nur kleine Zeitintervalle betrachtet werden.

Herleitung mithilfe der Impulsänderung

Ein weiterer Herleitungsansatz ergibt sich über die Impulserhaltung. Die Impulsänderung $\Delta p = m \cdot \Delta v$ der Kreisbewegung wird während der Zeit Δt durch die Zentripetalkraft verursacht. Wegen $F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$ gilt dann in dem Fall:



B4 Impulsänderung bei der Kreisbewegung.

① $\Delta p = m \cdot \Delta v = F_{Zp} \cdot \Delta t$

Die Vektoren $\vec{p}(t)$ und $\vec{p}(t + \Delta t)$ entsprechen den Vektoren $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ auf der vorigen Seite, multipliziert mit der Masse m des Körpers: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$.

In B4 ist beispielhaft der Impuls zur Zeit t sowie zur Zeit $t + \Delta t$ dargestellt. Die Richtung entspricht der Richtung des jeweiligen Geschwindigkeitspfeils, also ganz analog zur Herleitung auf S. 23. Ebenfalls analog dazu haben die beiden Impulspfeile auch die gleiche Länge. Wie dargestellt können wir das so gebildete Dreieck in zwei identische, rechtwinklige Dreiecke zerlegen. Daraus ergibt sich:

$$\sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = \frac{\frac{\Delta p}{2}}{p} \Rightarrow \Delta p = 2p \cdot \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$$

Für kleine Winkel $\Delta\varphi$ gilt näherungsweise $\sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \approx \frac{\Delta\varphi}{2}$. Daraus folgt

② $\Delta p = p \cdot \Delta\varphi$.

Diese Näherung wurde in ähnlicher Form beim Lösungsansatz auf S. 23 durchgeführt.

Mit den Definitionen $\Delta\varphi = \omega \cdot \Delta t$ und $p = m \cdot v$, eingesetzt in ②, erhält man

③ $\Delta p = m \cdot v \cdot \omega \cdot \Delta t$

Die Kombination von ① und ③ liefert den bekannten Ausdruck für F_{Zp}.

Musteraufgabe

Ein Stein der Masse $m = 0{,}50$ kg wird an einer Schnur auf einer waagrechten Kreisbahn vom Radius $r = 1{,}0$ m genau 2,0 m über dem Boden bewegt. Die Schnur übt eine Zentripetalkraft von 25 N auf den Stein aus.

a) Berechnen Sie die Bahn- und Winkelgeschwindigkeit des Steins.

b) Geben Sie begründet an, wie sich die auf die Schnur wirkende Kraft bei Halbierung der Umlaufdauer ändert.

c) Beschreiben Sie die Bewegung des Steins, wenn die Schnur plötzlich reißt, bis zum Auftreffen auf dem Boden.

Lösung

a) $F_{Zp} = mr\omega^2 \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{F_{Zp}}{mr}}$

$\omega = \sqrt{\frac{25\ \text{N}}{0{,}50\ \text{kg} \cdot 1{,}0\ \text{m}}} = 7{,}1\ \frac{1}{\text{s}}$

$v = r \cdot \omega = 7{,}1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$

b) Halbe Umlaufdauer bedeutet doppelte Winkelgeschwindigkeit und wegen $F \sim \omega^2$ vierfache Kraft.

c) Der Stein fliegt tangential zur Kreisbahn weg und auf einer Parabelbahn (waagrechter Wurf) bis zum Boden. In x-Richtung findet also keinerlei Beschleunigung mehr statt, es handelt sich um eine lineare Bewegung. In y-Richtung führt die Fallbeschleunigung zu einer beschleunigten Bewegung.

Arbeitsaufträge

1 \ Wählen Sie einen der drei Herleitungsansätze für die Zentripetalkraft bzw. Zentripetalbeschleunigung aus und führen Sie die Rechnung nochmal ausführlich im Heft durch. Begründen Sie, dass aus physikalischer Sicht die durchgeführte Näherung sinnvoll ist.

2 \ Fünf gleiche Spielfiguren stehen auf einer zunächst ruhenden Scheibe, die nun immer schneller gedreht wird.



Beschreiben Sie physikalisch begründet, wie sich der Bewegungszustand der einzelnen Figuren ändert.

3 \ Ein 8,0 m langer Rotorflügel eines Hubschraubers rotiert mit einer Frequenz von $f = 2{,}0$ Hz.

a) Berechnen Sie die Zentripetalbeschleunigung an der Rotorspitze und vergleichen Sie sie mit der Fallbeschleunigung g.

b) Berechnen Sie die Geschwindigkeit an der Rotorspitze.

4 \ Der Hammer eines Hammerwerfers besteht aus einer Stahlkugel, die an einem 1,22 m langen Stahlseil befestigt ist. Um eine ordentliche Weite zu erzielen, versucht ein Hammerwerfer, seinen Hammer mit $25{,}0\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ abzuwerfen. Die Armlänge des Werfers beträgt 86,0 cm. Er vollführt drei Drehungen, wobei er immer schneller wird.

a) Bestimmen Sie die Frequenz seiner Drehung, die er kurz vor dem Abwurf erreicht.

b) Berechnen Sie den Betrag der Kraft, mit der er die Kugel der Masse 7,16 kg kurz vor dem Abwurf halten muss.

c) Um die Zuschauer zu schützen, befindet sich seitlich und hinter dem Hammerwerfer ein Netz. Der Hammer muss also in einem bestimmten Bereich losgelassen werden, damit er das Feld erreicht. Skizzieren Sie die Situation aus Sicht von oben und zeichnen Sie geeignete Positionen zum Loslassen des Hammers ein.

5 \ Durch ungleichmäßige Abnutzung oder auch durch das Ventil kann es vorkommen, dass ein Autoreifen „nicht rund“ läuft und ausgewuchtet werden muss.

a) Erläutern Sie durch eine geeignete Berechnung, dass sich eine fehlende Auswuchtmasse von 10 g am Rand einer Felge (d = 45 cm) bei einer Geschwindigkeit von 100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ stark auf den Fahrkomfort auswirkt.

b) Beim Vibrationsalarm eines Handys macht man sich diese „Unwucht“ zunutze. Erläutern Sie, wie das umgesetzt werden kann.

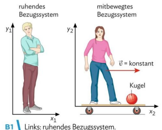
Hilfestellung auf Seite 210-212

Bezugssysteme

Bisher haben wir Bewegungen immer nur in ruhenden Bezugssystemen beschrieben. Das kann das System eines am Straßenrand stehenden Beobachters einer geradlinigen Bewegung sein, aber auch der Vater, der sein Kind auf der Kreisbahn in einem Karussell beobachtet. In diesem System verläuft eine kraftfreie Bewegung immer ohne Änderung des Bewegungszustands ab. Dies gilt auch für sich mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig bewegte Bezugssysteme, wie z. B. bei Überholvorgängen, die auch vom Standpunkt des Überholten betrachtet und berechnet werden können.

In ruhenden oder gleichförmig bewegten Bezugssystemen gilt stets der Trägheitssatz, ohne eine äußere Kraft ändert sich der Bewegungszustand eines Körpers nicht. Ein solches System wird als Inertialsystem bezeichnet.

Im x_1-y_1-System in B1 bewegt sich die rote Kugel mit der konstanten Geschwindigkeit v vom ruhenden Beobachter weg, im bewegten System ruht sie aus Sicht des mitbewegten Beobachters. Wird der Wagen durch eine Kraft nach rechts beschleunigt, machen die beiden Personen völlig unterschiedliche Beobachtungen. Für den ruhenden Beobachter wird sich die Kugel weiter mit der Geschwindigkeit v nach rechts bewegen, da auf die Kugel keine Kraft wirkt. Sie bewegt sich also mit ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit, während der Wagen schneller wird. Der mitbewegte, ebenfalls beschleunigte, Beobachter wird deshalb die Kugel auf sich zurollen sehen, da er sich schneller bewegt als die Kugel. Aus seiner Sicht muss also eine nach links gerichtete Kraft auf die Kugel wirken.



B1 Links: ruhendes Bezugssystem. Rechts: bewegtes Bezugssystem.

Betrachten wir nun eine Kugel, die in einem zunächst ruhenden Waggon an der Decke hängt (vgl. B2). Beschleunigt nun der Waggon nach rechts, sieht ein Mitfahrer die Kugel nach links schwingen. Es muss also im Bezugssystem „Waggon" eine Kraft auf sie wirken, die dann durch die Horizontalkomponente der Gewichtskraft ausgeglichen wird, sodass sich letztlich die ausgelenkte Kugel nicht noch weiter bewegt. Steht der Beobachter an der hinteren Wand des Waggons, verspürt er eine Kraft, die ihn dagegen drückt. Ein außenstehender Beobachter wird die Situation dagegen so interpretieren, dass auf die Kugel keine durch die Beschleunigung verursachte Kraft wirkt, während der Waggon sich schneller fortbewegt.



B2 Eine Kugel in einem ruhenden und in einem beschleunigten Waggon.

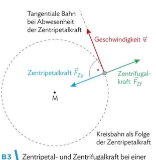
Auf die Kugel wirkt also nur scheinbar eine Kraft, da sie eigentlich ihren Bewegungszustand beibehält. Wir sprechen von einer *Scheinkraft*.

In beschleunigten Bezugssystemen wirken Scheinkräfte, die von der Beschleunigung des Systems abhängen und ihre Ursache in der Trägheit der Massen haben.

Die Zentrifugalkraft

Beschreibt man eine Kreisbewegung von außen, so haben wir in den vorangegangenen Kapiteln gesehen, dass sie ihre Ursache in der stets zum Mittelpunkt hin gerichteten Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$ hat. Für einen mitbewegten Beobachter, z. B. ein Kind in einem Karussell, stellt sich die Sachlage allerdings anders dar: Es wird durch eine Kraft nach außen an den Sitz gedrückt, dessen Lehne es hält.

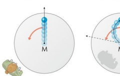
Diese in einem rotierenden Bezugssystem auftretende Scheinkraft wird als Zentrifugalkraft $\vec{F}_{Zf}$ bezeichnet. Die Zentrifugalkraft ist keine reale Kraft (daher der Name Scheinkraft), sondern tritt nur für einen Beobachter in einem beschleunigten Bezugssystem auf. Sie wirkt stets gegen die Beschleunigung und ist somit eine Trägheitskraft. Sie ist entgegen der Zentripetalkraft gerichtet und im rotierenden Bezugssystem auch direkt messbar. Der rotierende Beobachter, z. B. in einem Karussell, spürt die Zentrifugalkraft, die radial nach außen wirkt. Aufgrund des Newtonschen Wechselwirkungsgesetzes übt die Lehne des Karussells eine gleichgroße, entgegengesetzte Kraft auf den Beobachter aus. Er wird dadurch in seiner Position gehalten.

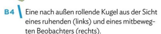


B3 Zentripetal- und Zentrifugalkraft bei einer Kreisbewegung.

Die Zentrifugalkraft $\vec{F}_{Zf}$ ist eine im rotierenden Bezugssystem auftretende Scheinkraft, die ihre Ursache in der Trägheit des Körpers hat. Sie ist der Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$ entgegengerichtet, also stets vom Mittelpunkt nach außen. Ihr Betrag entspricht aber dem der Zentripetalkraft: $F_{Zp} = F_{Zf} = m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot \frac{v^2}{r}$

Damit wird aber auch sofort ein Problem des beschleunigten Bezugssystems ersichtlich, nämlich dass die Newtonschen Gesetze der Mechanik nicht mehr uneingeschränkt gelten können. Insbesondere gilt in einem solchen System der Trägheitssatz nicht. Ein sich im Kräftegleichgewicht befindlicher Körper führt im rotierenden Bezugssystem keine geradlinig gleichförmige Bewegung aus. B4 zeigt eine Kugel, die für einen außenstehenden Beobachter aufgrund fehlender Kraft gleichförmig geradlinig radial nach außen rollt. Für den Beobachter auf der Drehscheibe rollt sie aufgrund der Drehbewegung allerdings in einem Bogen, für ihn muss also eine Kraft (Scheinkraft) wirken. Diese Art der Scheinkraft wird als Corioliskraft bezeichnet. Sie ist neben der Zentrifugalkraft also eine zweite Scheinkraft, die nur im rotierenden Bezugssystem auftritt. Die Corioliskraft soll im Folgenden aber nicht näher untersucht werden; wir konzentrieren uns nur auf die Zentrifugalkraft als Scheinkraft.





B4 Eine nach außen rollende Kugel aus der Sicht eines ruhenden Beobachters (links) und eines mitbewegten Beobachters (rechts).

Ein anschauliches Video zur Corioliskraft finden Sie hier:

MC 67051-02

Beispiel: Looping einer Achterbahn

In manchen Fällen ist es verständlicher aus Sicht des Beobachters im rotierenden System zu argumentieren. Die Berechnungen führen wir aber immer aus Sicht von außen durch. Beispiel:

Eine Achterbahn soll einen Looping im höchsten Punkt mit der Geschwindigkeit 40 $\frac{km}{h}$ durchfahren.

Ermitteln Sie den Radius der Bahn und treffen Sie begründet eine Aussage darüber, ob dies ein Mindest- oder ein Höchstwert ist, um den Looping bei der Geschwindigkeit durchfahren zu können.

B5 Looping einer Achterbahn.

Ein mitbewegter Beobachter würde folgendermaßen argumentieren:
Im höchsten Punkt muss die Gewichtskraft gleich der Zentrifugalkraft sein:
$F_G = F_{Zf} \Rightarrow mg = m \cdot \frac{v^2}{r}$
Man erhält $r \approx 13$ m.
Mit wachsendem Radius wird F_{Zf} bei gleicher Geschwindigkeit kleiner, während die Gewichtskraft gleichbleibt. Der berechnete Wert ist also der größtmögliche Radius.

Aus Sicht eines Mitfahrers muss im höchsten Punkt des Loopings die Zentrifugalkraft genauso groß sein wie die Gewichtskraft auf die Wagen der Achterbahn, damit diese nicht hinabstürzen. In diesem Fall heben sich die beiden Kräfte gerade auf und man fühlt sich für einen kurzen Moment schwerelos.

Aus der Sicht eines außenstehenden Beobachters ist die Kraft, die das Metallgestänge während der Durchfahrt durch den Looping auf die Achterbahn ausübt, die Zentripetalkraft. Im höchsten Punkt wirkt im Grenzfall die Gewichtskraft als Zentripetalkraft. In diesem Fall ist keine zusätzliche Kraft des Metallgestänges notwendig.

Da die Formeln für F_{Zf} und F_{Zp} gleich sind, ist es für den höchsten Punkt auch möglich, die Berechnung mithilfe der Zentrifugalkraft durchzuführen: Man erhält das gleiche Ergebnis wie bei der Zentripetalkraft. Wir werden rechnerisch die Situationen jedoch immer von außen betrachten. Somit muss im Grenzfall gelten:

$$F_G = F_{Zp}$$

$$\Rightarrow m \cdot g = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$r = \frac{v^2}{g} = \frac{\left(\frac{40}{3{,}6}\,\frac{m}{s}\right)^2}{9{,}81\,\frac{m}{s^2}} = 12{,}6\text{ m} \approx 13\text{ m}$$

Da F_{Zp} bei gleicher Geschwindigkeit mit wachsendem Radius kleiner wird, wäre die Gewichtskraft bei größerem Radius größer als die benötigte Zentripetalkraft. Der berechnete Wert ist also der größtmögliche Radius.

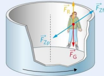
Beispiel: rotierendes Wasserglas

Stellt man ein Wasserglas auf eine rotierende Scheibe, wird das Wasser wie in B6 dargestellt an die Glaswände gedrückt. Die Wassermoleküle erfahren dabei eine zur Zylinderwand gerichtete Zentrifugalkraft. Da sich das Wasser nicht weiter zur Seite ausbreiten kann, „stapeln" sich die Wassermoleküle am Rand, wodurch der Wasserstand am Rand höher ist als in der Mitte. Bleibt die Rotation konstant, bleibt auch der Wasserstand unverändert: Der Glasrand sorgt dafür, dass eine nach innen gerichtete Zentripetalkraft die Wassermoleküle auf der jeweiligen Rotationsbahn hält.



B6 Rotierendes Wasserglas.

Musteraufgabe



Bei einem Rotor werden die Fahrgäste so an die Wand des Zylinders gepresst, dass sie wegen der Haftreibungskraft (Haftreibungszahl $\mu = 0{,}70$) nicht herunterrutschen, wenn der Boden abgesenkt wird.

a) Benennen Sie die Kräfte auf den Fahrgast, sowohl aus der Sicht des mitbewegten Fahrgastes als auch von außen.
b) Berechnen Sie die Mindestfrequenz der rotierenden Trommel, wenn deren Durchmesser 9,0 m beträgt.
c) Diskutieren Sie den Einfluss der Masse des Fahrgasts.

Lösung

a) Auf den mitbewegten Fahrgast wirken: die Zentrifugalkraft radial nach außen; die durch die Trommel hervorgerufene Gegenkraft; die Gewichtskraft nach unten; die Haftreibungskraft nach oben. Von außen gesehen übt die Trommel die Zentripetalkraft aus und der Fahrgast dadurch eine Gegenkraft auf die Trommel. Weiterhin wirken die Gewichtskraft nach unten und die Haftreibungskraft nach oben.
b) Die Haftreibungskraft (hervorgerufen durch die Zentripetalkraft) muss mindestens so groß sein wie die Gewichtskraft:

$$F_R = \mu \cdot F_{Zp} = m \cdot g = F_G$$

$$\mu \cdot m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot g$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\mu \cdot r}} \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\mu \cdot r}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0{,}70 \cdot 4{,}5\,\text{m}}} = 0{,}28\,\text{Hz}$$

c) Wie man an der Lösung der Aufgabe b) sieht, kommt die Masse m im Ansatz des Kräftegleichgewichts auf beiden Seiten vor. Sie kann deshalb herausgekürzt werden. Die Masse des Fahrgasts spielt deshalb keine Rolle.

μ ist die Haftreibungszahl und abhängig von der Art der Oberfläche. Der Betrag der Haftreibungskraft ist dann das Produkt der Haftreibungszahl mit dem Betrag der Normalkraft. Im Beispiel in der Musteraufgabe wirkt die Normalkraft als Zentripetalkraft, da sie senkrecht zu der Richtung steht, in die die Reibung wirkt. Näheres dazu finden Sie in Kap. 2.4.

Arbeitsaufträge

**1 ** Eine fiktive Raumstation habe die Form eines Zylinders mit einem Durchmesser von 18 m. Um den Astronauten das Leben an Bord angenehm zu gestalten, soll durch Rotation an der Außenwand künstlich die Schwerkraft der Erde hergestellt werden. Berechnen Sie die hierfür erforderliche Drehfrequenz der Station.

**2 ** Berechnen Sie die kleinste Geschwindigkeit, mit der eine Achterbahn einen Looping mit Durchmesser 25 m durchfahren muss, damit sie auf den Schienen bleibt und nicht nach unten fällt.

**3 ** a) Bei einem neuartigen Fahrgeschäft sitzen die Besucher in Gondeln, die zunächst auf einem waagrechten Kreis von 16 m Durchmesser gedreht werden. Die Drehfrequenz wird langsam auf 0,35 Hz erhöht. Zeigen Sie, dass die Kraft auf einen Mitfahrer etwa dem Vierfachen seiner Gewichtskraft entspricht.
b) Nun wird bei dieser Drehfrequenz die Drehebene senkrecht gestellt.
Geben Sie begründet die auf den Mitfahrer wirkenden Kräfte in Vielfachen seines Gewichts im höchsten und im tiefsten Punkt der Bahn an.

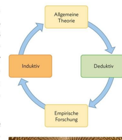
**4 ** Katzengras wächst normalerweise senkrecht nach oben, entgegen der Schwerkraft. Stellt man den Topf jedoch längere Zeit an den Rand auf eine sich drehende Scheibe, ändert sich die Richtung, in die das Gras wächst. Geben Sie, physikalisch begründet, die Wachstumsrichtung dieses Katzengrases an.

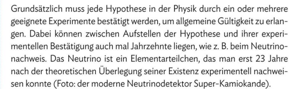


↳ weitere passende Aufgaben:
S. 42, Nr. 7; S. 43, Nr. 12, 18; S. 45, Nr. 22

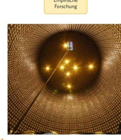
V1 Vorbereitung und grundsätzliche Überlegungen

In Schülerexperimenten haben Sie schon öfter den induktiven Weg (vgl. Methode S. 22) bei der Herleitung einer physikalischen Formel beschritten, z. B. beim waagrechten Wurf. Hier haben Sie aus der Beobachtung heraus Hypothesen formuliert und versucht, diese durch Experimente zu untermauern und schließlich eine Gesetzmäßigkeit zu finden. Nun haben Sie aber im Gegensatz dazu in diesem Kapitel bereits deduktiv eine Formel zur Berechnung des Betrags der Zentripetalkraft hergeleitet. Diese muss nun noch experimentell bestätigt werden, da auch deduktive Schlüsse falsch sein können, wenn von unzureichenden Prämissen ausgegangen wird.





Grundsätzlich muss jede Hypothese in der Physik durch ein oder mehrere geeignete Experimente bestätigt werden, um allgemeine Gültigkeit zu erlangen. Dabei können zwischen Aufstellen der Hypothese und ihrer experimentellen Bestätigung auch mal Jahrzehnte liegen, wie z. B. beim Neutrinonachweis. Das Neutrino ist ein Elementarteilchen, das man erst 23 Jahre nach der theoretischen Überlegung seiner Existenz experimentell nachweisen konnte (Foto: der moderne Neutrinodetektor Super-Kamiokande).



Bei diesem Experiment sollen Sie nun die Abhängigkeit der Zentripetalkraft von verschiedenen Größen überprüfen, wie sie sich aus der in Kapitel 2.1 hergeleiteten Formel ergeben.

$$F_{Zp} = m \cdot a_{Zp} = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot r \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

Arbeitsauftrag

Finden Sie sich in kleinen Gruppen zusammen. Diskutieren Sie vorab zur Planung, Durchführung und Auswertung der Experimente folgende Arbeitsaufträge und halten Sie Ihre Ergebnisse in übersichtlicher und auch für andere nachvollziehbarer Form fest.

a) Recherchieren Sie in Ihrem täglichen Umfeld geeignete Apparaturen, die sich für eine Beobachtung der Kreisbewegung und Messung der Größen eignen. Überlegen Sie sich den Aufbau der Versuchsanordnung und wie Sie die einzelnen Größen messen können (denken Sie hierbei insbesondere an digitale Messwerkzeuge!).
Als Beispiel für eine passende Apparatur können eine Salatschleuder oder eine Fahrradfelge genannt werden.

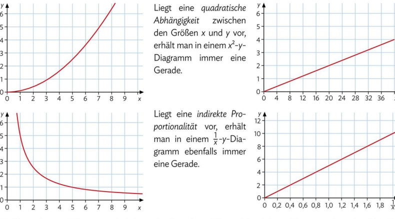
b) Machen Sie sich mit den Sensoren Ihres Smartphones (z. B. Beschleunigungssensor) vertraut und recherchieren Sie nach einer App, die die Verwendung in Ihrer in a) ausgewählten Versuchsanordnung ermöglicht. Informieren Sie sich über das grundlegende Funktionsprinzip des Beschleunigungssensors und fassen Sie Ihre Ergebnisse zusammen. Der Mediencode kann dabei helfen.


MC 67051-03

c) Beantworten Sie zur Planung des Experiments folgende Fragen:
- Welche Größen kann ich gleichzeitig messen, welche muss ich dafür konstant halten?
- Welche Zusammenhänge, z. B. Proportionalität, bestehen zwischen den Messgrößen?
- Worauf muss ich bei der Durchführung des Experiments besonders achten, um mögliche Messunsicherheiten zu minimieren, oder von vornherein auszuschließen? Beachten Sie dazu auch die Methode auf S. 61!

V2 Durchführung und Auswertung

Bei der experimentellen Umsetzung und insbesondere bei der Erstellung eines Versuchsprotokolls hilft Ihnen die Struktur, die Sie bereits eingeübt haben (ZABMA, vgl. Methode S. 220).
Bei der Auswertung sollten Sie insbesondere auch lineare und quadratische Zusammenhänge untersuchen.
In der Wertetabelle eines ordentlich durchgeführten Experiments erkennt man an den Messwerten ziemlich leicht, ob eine *direkte Proportionalität* vorliegt oder nicht. Zur Sicherheit empfiehlt es sich aber auch hier, die Werte in einem Diagramm darzustellen, dem man dann auch weitere Werte (wie etwa die Steigung der Geraden) entnehmen kann.
Quadratische Abhängigkeiten, oder auch *indirekte Proportionalitäten*, kann man mit der Wertetabelle manchmal nur schwer belegen. Hilfreich ist oftmals eine geeignete graphische Darstellung. Quadratische Abhängigkeiten bzw. indirekte Proportionalitäten lassen sich dann wie folgt feststellen:



Liegt eine *quadratische Abhängigkeit* zwischen den Größen x und y vor, erhält man in einem x^2-y-Diagramm immer eine Gerade.

Liegt eine *indirekte Proportionalität* vor, erhält man in einem $\frac{1}{x}$-y-Diagramm ebenfalls immer eine Gerade.

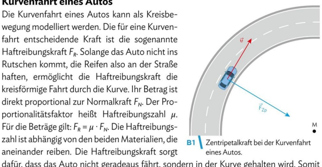
Die Form des x-y-Diagramms deutet meist schon darauf hin, welche Art von Zusammenhang besteht. Die Vermutung sollte dann entsprechend durch ein x^2-y-Diagramm bzw. $\frac{1}{x}$-y-Diagramm bestätigt werden.

Arbeitsauftrag

a) Führen Sie zu jeder von Ihnen genannten Abhängigkeit unter Nutzung elektrischer Sensoren ein geeignetes Experiment durch und werten dieses aus. Hierbei können Ihnen die Hinweise zur Diagrammerstellung hilfreich sein.
b) Untersuchen Sie mögliche Quellen für Messunsicherheiten und ihren Einfluss auf das Versuchsergebnis. Beschreiben Sie darauf aufbauend Maßnahmen zur Ausschaltung oder Minimierung des Einflusses. Beachten Sie dazu auch die Methode auf S. 61!
c) Diskutieren Sie die jeweiligen Einzelergebnisse hinsichtlich ihrer Aussagekraft für die Richtigkeit der hergeleiteten Formel.
d) Fassen Sie diese Ergebnisse in einem Beitrag zusammen und liefern dadurch einen fundierten experimentellen Beleg für die Richtigkeit der Formel.
e) Zeigen Sie auch den induktiven Weg auf, indem Sie beschreiben, wie Sie aus den einzelnen Versuchsergebnissen auf die Formel für die Zentripetalkraft schließen können.

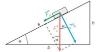
Kurvenfahrt eines Autos

Die Kurvenfahrt eines Autos kann als Kreisbewegung modelliert werden. Die für eine Kurvenfahrt entscheidende Kraft ist die sogenannte Haftreibungskraft F_R. Solange das Auto nicht ins Rutschen kommt, die Reifen also an der Straße haften, ermöglicht die Haftreibungskraft die kreisförmige Fahrt durch die Kurve. Ihr Betrag ist direkt proportional zur Normalkraft F_N. Der Proportionalitätsfaktor heißt Haftreibungszahl μ. Für die Beträge gilt: $F_R = \mu \cdot F_N$. Die Haftreibungszahl ist abhängig von den beiden Materialien, die aneinander reiben. Die Haftreibungskraft sorgt dafür, dass das Auto nicht geradeaus fährt, sondern in der Kurve gehalten wird. Somit wirkt die Haftreibungskraft F_R als Zentripetalkraft F_{Zp} dieser Kreisbewegung.



B1 Zentripetalkraft bei der Kurvenfahrt eines Autos.

F_N ist die Normalkraft, die Sie noch von der schiefen Ebene kennen:



Im Beispiel in B1 entspricht die Normalkraft der Gewichtskraft. Ihre Richtung steht senkrecht auf der Richtung der Haftreibungskraft.

Fährt das Fahrzeug zu schnell in eine Kurve, kann es passieren, dass die Haftreibungskraft nicht mehr ausreicht, um die Zentripetalkraft aufzubringen. Dann wirkt nur noch die geringere Gleitreibungskraft, und das Auto rutscht tangential zum Kurvenbogen. Dabei kann es bei einer Rechtskurve auf die Gegenfahrbahn gelangen. Unfallgefahr!

Bei bekannter Haftreibungszahl kann man über folgenden Ansatz die maximale Geschwindigkeit berechnen, mit der man eine Kurve mit Radius r durchfahren kann:

$F_{Zp} = F_R$

$m \cdot \frac{v^2}{r} = \mu \cdot m \cdot g$

Umformen ergibt: $v = \sqrt{\mu \cdot g \cdot r}$

Maximale Geschwindigkeit, um eine Kurve mit Radius r zu durchfahren:

$v = \sqrt{\mu \cdot g \cdot r}$

Beispiele für Haftreibungszahlen für Autoreifen bei unterschiedlichen Untergründen:

Straßenzustand	μ
trocken	0,7 – 1
nass	0,4 – 0,6
nasses Laub, Schnee	0,2 – 0,3
Eis	0,1
Aquaplaning	< 0,1

Die Haftreibung spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn die Reibung durch äußere Umstände wie Regen oder Schneeglätte verringert ist, vgl. Tabelle.

Beispiel: Während man eine Kurve vom Radius $r = 100$ m bei idealen Straßenbedingungen ($\mu = 1$) mit $31{,}3\,\frac{\text{m}}{\text{s}} = 113\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$ durchfahren kann, darf die Geschwindigkeit bei vereister Fahrbahn ($\mu = 0{,}1$) dagegen nur $36\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$ betragen!

Kurvenfahrt eines Zugs

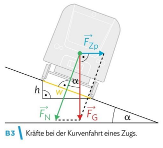
Bei einem Zug muss die äußere Schiene in der Kurve die Zentripetalkraft aufbringen, was vermehrten Verschleiß von Schiene und Radsatz nach sich zieht. Um dem vorzubeugen, erhöht man die äußere Schiene in der Kurve, wodurch diese auch mit höherer Geschwindigkeit durchfahren werden kann. Im Idealfall sind Überhöhung und Geschwindigkeit so aufeinander abgestimmt, dass eine minimale Abnutzung der Schiene und der Räder entsteht.


B2 Geneigte Schienen bei einer Kurve einer Bahnstrecke.

Die Gewichtskraft F_G wird zerlegt in die Normalkraft F_N und in die Zentripetalkraft F_{Zp}. In B3 wurden diese Kräfte für die Situation eingezeichnet. Man erkennt:

$\tan\alpha = \frac{F_{Zp}}{F_G} = \frac{m \cdot v^2}{r \cdot m \cdot g} = \frac{v^2}{r \cdot g}$

Der Zug sollte also idealerweise die Kurve mit der Geschwindigkeit $v = \sqrt{r \cdot g \cdot \tan\alpha}$ befahren. Ist er langsamer, wird die kurveninnere Schiene (rechts) stärker belastet; ist er schneller, die äußere Schiene.
Für die Überhöhung h findet man $h = w \cdot \sin\alpha$. Dabei ist w der Abstand der Schienen voneinander, die sogenannte Spurweite.



B3 Kräfte bei der Kurvenfahrt eines Zugs.

Die Überhöhung h stellt den Höhenunterschied zwischen den Schienen dar.

Spurweite in Deutschland: $w = 1{,}435$ m

Kurvenfahrt eines Motorrads oder Fahrrads

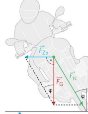
Ein Fahrrad- oder Motorradfahrer muss sich bei einer Kurvenfahrt „in die Kurve legen" (vgl. B4). Die für die Kurvenfahrt erforderliche Zentripetalkraft wird auch hier von der Haftreibungskraft erbracht.
Kennzeichnen wir den Neigungswinkel mit φ, so ergibt sich der in B4 dargestellte Zusammenhang der wirkenden Kräfte.
Damit lässt sich die für die Kurvenfahrt notwendige Zentripetalkraft F_{Zp} berechnen:

$\tan\varphi = \frac{F_{Zp}}{F_G} \Rightarrow F_{Zp} = F_G \cdot \tan\varphi$

Wir wählen wieder den gewohnten Lösungsansatz:

$F_{Zp} = F_R \Rightarrow F_{Zp} = \mu \cdot F_G$

Formen wir diese beiden Beziehungen um, erhalten wir einen Zusammenhang zwischen der maximalen Schräglage des Motorradfahrers und der Haftreibungszahl: $\tan\varphi = \mu$.



B4 Kräfte bei der Kurvenfahrt eines Motorrads.

Die Schräglage eines Motorradfahrers in der Kurve mit Radius r ist begrenzt durch die Haftreibungszahl zwischen Reifen und Straße: $\tan\varphi = \mu$.
Seine maximal mögliche Geschwindigkeit beträgt: $v = \sqrt{r \cdot g \cdot \tan\varphi}$

Methode

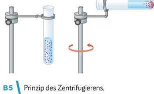
Adressatenbezogene Argumentation

Immer wenn Sie Ihre Ergebnisse darstellen, sollten Sie sich gut überlegen, an wen Sie sich damit wenden möchten und Ihre Darstellung danach richten. Dadurch können Sie sicherstellen, dass Ihre Zielgruppe die Ausführungen nachvollziehen kann. Folgende Fragen können Ihnen dabei helfen:

- *Wie alt ist die Zielgruppe?* Das ist z. B. dafür wichtig, wie Sie die Informationen visualisieren (vgl. auch Methode auf S. 101) oder auf welchem sprachlichen Niveau Sie Ihre Texte formulieren (kurze/lange Sätze; Fremdwörter; ...).
- *Welches Vorwissen hat die Zielgruppe?* Ggf. müssen Sie zu Beginn Ihrer Darstellungen zunächst einige Grundlagen erklären.
- *Welche Interessen hat die Zielgruppe?* Das kann dabei helfen, die Zielgruppe stärker für das Thema zu begeistern.
- *Welche Erwartungen hat die Zielgruppe an Ihre Darstellung?* Manche wollen das eigene Wissen erweitern, andere vielleicht einen Ratschlag einholen, wiederum andere sich nur einen kurzen Überblick verschaffen.

Zentrifugen

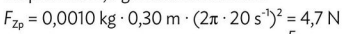
Mit einer Zentrifuge kann man Stoffe trennen, da sich durch die Zentrifugalkraft aufgrund der Massenträgheit der Stoff mit der größeren Dichte außen am Gefäß absetzt (vgl. B5).



B5 Prinzip des Zentrifugierens.

Im Haushalt findet man auch Anwendungen dieser Technik, wie z. B. bei einer Wäscheschleuder oder Salatschleuder.

Die feuchte Wäsche in der Waschmaschine wird durch die Rotation der Trommel nach außen an die Trommel gedrückt. Da die Trommel gelöchert ist, können die Wassertröpfchen darüber abfließen, auf sie wirkt in dem Moment keine Zentripetalkraft. In einer Trommel von 60 cm Durchmesser, die mit 1200 Umdrehungen pro Minute rotiert, lässt sich die Zentripetalkraft auf einen Tropfen von 1,0 g Masse berechnen:



$F_{Zp} = 0{,}0010\ \text{kg} \cdot 0{,}30\ \text{m} \cdot (2\pi \cdot 20\ \text{s}^{-1})^2 = 4{,}7\ \text{N}$

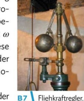
Die Zentripetalbeschleunigung $a_{Zp} = \frac{F_{Zp}}{m} = 4{,}7 \cdot 10^3\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, die der Tropfen dabei erfährt, entspricht also in etwa dem 480-fachen der Fallbeschleunigung g.



B6 Wäscheschleuder.

Fliehkraftregler

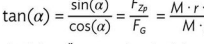
Der Fliehkraftregler wurde bereits 1788 von J. Watt zur Regelung der Drehfrequenz von Dampfmaschinen entwickelt. An einer rotierenden Achse sind zwei Hebel der Länge L mit Massen M befestigt, vgl. B7 und B8. Mit steigender Winkelgeschwindigkeit ω wird die Zentrifugalkraft auf die Massen M größer, wodurch diese sich nach außen und oben bewegen. Über ein Gestänge wird der Ring m, der die Dampfzufuhr der Dampfmaschine regelt, angehoben oder gesenkt.



B7 Fliehkraftregler.

Wenn sich nun die Maschine schneller dreht, bewegt sich also der Ring nach oben. Durch einen Mechanismus wird dadurch die Dampfzufuhr gedrosselt, die auch für die Drehbewegung des Reglers verantwortlich ist. Die Drehung wird also wieder verlangsamt, der Ring sinkt etwas nach unten. Dadurch kann insgesamt eine einigermaßen konstante Drehfrequenz realisiert werden.

Es ergibt sich folgende rechnerische Betrachtung:



$\tan(\alpha) = \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \frac{F_{Zp}}{F_G} = \frac{M \cdot r \cdot \omega^2}{M \cdot g} = \frac{r \cdot \omega^2}{g}$

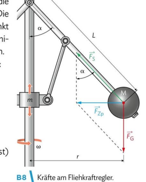
$\sin(\alpha) = \frac{r}{L} \Rightarrow r = L \cdot \sin(\alpha)$

Einsetzen der beiden Gleichungen ineinander:

$\frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \frac{L \cdot \sin(\alpha) \cdot \omega^2}{g}$

Folglich wird der Auslenkwinkel α nur durch L (fest) und ω (variabel) bestimmt:

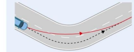
$\cos(\alpha) = \frac{g}{L \cdot \omega^2}$



B8 Kräfte am Fliehkraftregler.

Musteraufgabe

Obwohl streng verboten, kann man immer wieder beobachten, dass Fahrer eine Kure „schneiden“, um diese schneller durchfahren zu können.



a) Schätzen Sie die beiden im Bild gezeichneten Kurvenradien ab und berechnen Sie jeweils die Geschwindigkeit, mit der ein Auto bei trockener und bei nasser Straße die Kurve auf den eingezeichneten Bahnen durchfahren kann.

b) Beurteilen Sie damit die dargestellte Situation, insbesondere im Hinblick auf die möglichen Gefahren des „Kurvenschneidens“ (vgl. Methode „Beurteilen“ auf S. 223).

c) Erstellen Sie eine physikalisch begründete Stellungnahme für Ihre Schülerzeitung (vgl. Methode auf S. 33). Achten Sie dabei auf die korrekte Bezeichnung der Kräfte.

Lösung

a) Grundlage der Abschätzung der Radien ist das gezeichnete Auto. Ein Auto ist etwa 5,0 m lang. Damit ergibt sich für die gestrichelte Kurve ein Radius von etwa 15 m und für die durchgezogene Linie ein Radius von etwa 30 m.
Die maximale Geschwindigkeit des Autos berechnet sich gemäß der Formel $v = \sqrt{\mu \cdot g \cdot r}$.
Man erhält für $\mu_{\text{trocken}} = 1$ und $\mu_{\text{nass}} = 0{,}5$ folgende Ergebnisse:
Gestrichelte Linie: $v_{\text{trocken}} = 12\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$; $v_{\text{nass}} = 8{,}6\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Durchgezogene Linie: $v_{\text{trocken}} = 17\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$; $v_{\text{nass}} = 12\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$

b) Man sieht, dass bei einem „Schneiden“ der Kurve selbige mit einer deutlich höheren Geschwindigkeit durchfahren werden kann. Bei Gefahr oder Gegenverkehr muss man jedoch nach rechts ausweichen und die Kurve nun in einem neuen, kleineren Radius durchfahren. Das ist aufgrund der höheren Geschwindigkeit physikalisch nicht möglich und führt zwangsläufig zu einem Unfall. Daher ist ein Verbot des „Kurvenschneidens“ gerechtfertigt.

c) Wenn Sie einen Artikel für eine Schülerzeitung schreiben, müssen Sie davon ausgehen, dass noch nicht alle das Thema im Physikunterricht behandelt haben. Sie müssen also zunächst die physikalischen Grundlagen in möglichst einfacher Sprache erklären. Nutzen Sie dafür auch anschauliche Zeichnungen. Erklären Sie das Thema anhand eines einfachen, ganz konkreten Beispiels. Die Stellungnahme könnte wie folgt beginnen:
Weltweit kommt es jedes Jahr zu zahlreichen Verkehrsunfällen. Viele dieser Unfälle sind auf ein riskantes Fahrverhalten zurückzuführen. Zwar lässt sich z. B. durch das Schneiden einer Kurve etwas Zeit sparen. Dafür kann man kaum noch eventuellem Gegenverkehr ausweichen, wie folgendes Beispiel zeigt: ...

Arbeitsaufträge

**1 ** Es gibt Züge, die sich mittels hydraulischer Neigetechnik in die Kurve legen („Pendolino“).
Begründen Sie physikalisch exakt, dass damit kurvenreiche Strecken mit höheren Geschwindigkeiten befahren werden können. Erstellen Sie auch eine passende Skizze mit den wirkenden Kräften.

**2 ** a) Vervollständigen Sie die in der Musteraufgabe begonnene Stellungnahme für die Schülerzeitung (vgl. Methode S. 33).
b) Stellen Sie das gleiche Thema nun für eine der folgenden Zielgruppen dar: angehende Fahrlehrer; einen Freund / eine Freundin; jemanden, der mit Formeln nichts anfangen kann; eine physikalische Fachzeitschrift.

weitere passende Aufgaben:
S. 42, Nr. 1; S. 43, Nr. 9, 13, 14; S. 44, Nr. 21; S. 45, Nr. 23

**3 ** Ein Auto (m = 1,5 t) durchfährt bei trockener Fahrbahn mit 90 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ eine Linkskurve mit einem Radius von 100 m.
a) Zeigen Sie durch eine geeignete Rechnung, dass dies gefahrlos möglich ist.
b) Berechnen Sie die maximal mögliche Geschwindigkeit eines Motorradfahrers bei idealen Bedingungen und maximaler Schräglage von 50°.
c) Um die Sicherheit zu erhöhen, soll vor der Kurve ein Schild „Bei Nässe xx $\frac{\text{km}}{\text{h}}$“ angebracht werden. Ermitteln Sie einen sinnvollen Wert für „xx“. Verfassen Sie dann eine kurze Stellungnahme zu dem Thema für eine Broschüre einer Fahrschule. Gehen Sie dabei auch auf Sicherheitsvorkehrungen beim Fahren auf nasser Fahrbahn ein.

3 Gravitation

Versuche und Materialien zu Kapitel 3.1

M1 Einstieg: Gravitation mit Obst und Igel





Dass Körper aufgrund der Gravitationskraft von der Erde angezogen werden, wissen Sie bereits aus der 8. Klasse. Das sogenannte Gravitationsgesetz verallgemeinert diese Beobachtungen, was sich mithilfe einfacher Betrachtungen von Obst nachvollziehen lässt. Zur Vereinfachung betrachten wir die Situation in der Schwerelosigkeit, wie z. B. auf der ISS. Schwebt eine Zitrone gegenüber einer Orange, so ziehen sich beide aufgrund ihrer Masse wechselseitig an. Steht die Orange mehreren identischen Zitronen gegenüber, so wird sie von allen angezogen. Verstecken wir die Zitronen in einer dünnen Papiertüte, können wir zwar nicht die Anzahl der Zitronen erkennen, könnten aber die Kraft auf die Orange messen und daraus auf die Anzahl der Zitronen schließen.

Ein Igel kann sich zur Abwehr von Feinden so einrollen, dass seine Stacheln fast in alle Richtungen zeigen. Ähnlich sieht ein „Käseigel" aus, bei dem für ein Buffet Spieße mit Käse und Trauben in eine halbkugelförmige Frucht gesteckt werden. Wie sofort ersichtlich ist, nimmt der Abstand zwischen den Spießen aufgrund deren Schrägstellung zu, je weiter man sich von der Halbkugel entfernt.



Arbeitsauftrag

a) Formulieren Sie eine Vermutung über die Veränderung der Anziehungskraft auf die Orange mit der Anzahl der Zitronen in der Tüte.
b) Finden Sie anstelle der Anzahl an Zitronen eine physikalische Größe für den Papiertüteninhalt, mit der sich der Zusammenhang mit der Anziehungskraft auf die Orange ebenso beschreiben lässt.
c) Nehmen wir an, jeder Käsespieß deckt einen gleich großen Bereich der Halbkugel ab, z. B. 3 cm^2. Untersuchen Sie die Veränderung der Dichte der Spieße auf einer zweiten Halbkugel, die einen doppelten Radius besitzt und über die erste gestülpt wird.
d) Vergleichen Sie für den Fall, dass jeder Spieß der kleineren Halbkugel für den gleichen Kraftbetrag steht, die jeweiligen Kräfte, die auf ein Flächenstück der beiden Halbkugeln wirken.

Versuche und Materialien zu Kapitel 3.2

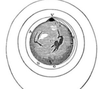
M2 Einstieg: Newton und der Apfel

In seinen „Memoirs of Sir Isaac Newtons Life" schildert William Stukeley, dass ihm Sir Isaac Newton am 25. April 1726 im Schatten seiner Apfelbäume berichtete, wie ihn 1666 ein herabfallender Apfel zu seinen Überlegungen zur Gravitationskraft anregte. Ausgehend vom Gedanken, dass der Apfel immer zum Erdmittelpunkt fällt, realisierte

Arbeitsauftrag

a) Erde und Apfel ziehen sich jeweils mit dem gleichen Kraftbetrag an. Erklären Sie, dass aber der Apfel auf die Erde fällt und nicht umgekehrt.

Newton, dass sich Apfel und Erde gegenseitig anziehen. So wurde ihm klar, dass sich Materie wechselseitig anzieht und diese Anziehung von der jeweiligen Masse ausgeht. Die dabei wirkende Kraft nannte er Gravitationskraft und erkannte, dass sie auch in den Weiten des Universums wirkt. Folglich ist die bisher bekannte Gewichtskraft nur eine Sonderform der Gravitationskraft. Newton hatte dazu bereits in seinem Werk „Philosophiae naturalis principia mathematica“ von 1687 überlegt, dass ein Stein, der waagrecht weggeworfen wird, umso weiter auf einer Parabel fliegen wird, je schneller er weggeworfen wird. Da sich die Erde aber krümmt ($M_E = 5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg, $r_E = 6370$ km), würde der Stein sogar die Erde umkreisen, würde er nur schnell genug geworfen werden – so etwas schafft natürlich nur jemand wie „Obelix“ (im Film „Asterix erobert Rom“) mit einem Speer! Und würde der Stein in entsprechender Höhe geworfen, so würde er beispielsweise sogar die Mondbahn beschreiben.



b) Beschreiben Sie die Voraussetzungen dafür, dass ein waagrecht geworfener Körper bei ausreichend großer Startgeschwindigkeit überhaupt die Erde umkreisen könnte.
c) Leiten Sie mithilfe der Gewichtskraft die Geschwindigkeit her, mit der ein Speer um die Erde kreisen müsste, damit er nicht zu Boden fällt. Vernachlässigen Sie die Luftreibung und gehen Sie von einer bodennahen Umkreisung des Speeres aus.
d) Recherchieren Sie die Geschwindigkeit, mit der die ISS in 400 km Höhe über dem Boden um die Erde kreist, und vergleichen Sie mit Teilaufgabe c).
e) Betrachten Sie den Speerwurf von „Obelix“ als waagrechten Wurf und leiten Sie daraus die nötige Bahngeschwindigkeit des Speers her, um die Erde zu umkreisen.

M3 Lernaufgabe: Satellitenbahnen



Das moderne Leben ist ohne Satelliten nicht mehr vorstellbar. Denn wir sind es gewohnt, jederzeit mit dem Handy unseren Standort per GPS bestimmen zu können oder möglichst zuverlässige Wettervorhersagen für unsere Freizeitgestaltung zu erhalten. Darüber hinaus wünschen wir uns für jeden Ort der Erde eine Datenverbindung für Telefonie oder Internet. Und nicht zuletzt ist es für uns selbstverständlich, dass mehrere Astronautinnen und Astronauten auf der „ISS“ leben oder dass Teleskope wie „Hubble“ oder „Webb“ aus dem Weltall beeindruckende Aufnahmen des Kosmos liefern. Für die Nutzung der Satelliten ist ihr Bahnverlauf von zentraler Bedeutung. Für Berechnungen betrachten wir nur Satelliten mit Kreisbahnen (Erde: $M_E = 5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg, $r_E = 6370$ km). Es versteht sich von selbst, dass die Satelliten während ihres Einsatzes natürlich auch keinen Schaden nehmen sollten.

Arbeitsauftrag

a) Recherchieren Sie die Begriffe LEO, MEO und GEO und geben Sie die jeweiligen Nutzungszwecke der Satelliten an.
b) Erklären Sie, dass ein Satellit trotz der Erdanziehungskraft nicht auf die Erde stürzt.
c) Begründen Sie, dass die Masse eines Satelliten auf seiner kreisförmigen Bahn um die Erde keinen Einfluss auf die benötigte Bahngeschwindigkeit oder die Umlaufdauer hat.
d) Berechnen Sie die Umlaufdauer des Hubble-Teleskops in 547 km Höhe über dem Erdboden und vergleichen Sie mit einem recherchierten Wert.
e) Recherchieren Sie das Kessler-Syndrom. Diskutieren Sie die so entstehenden Risiken.

Gravitationsgesetz

Erinnerung:
Gewichtskraft
$F_G = m \cdot g$

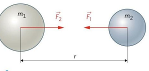
Fallbeschleunigung g:
mittlerer Wert: $9{,}81\,\frac{m}{s^2}$
am Äquator: $9{,}780\,\frac{m}{s^2}$
an den Polen: $9{,}832\,\frac{m}{s^2}$

Tagtäglich spüren wir, dass Körper von der Erde angezogen werden. Aus der Berechnung der Gewichtskraft wissen wir, dass die Anziehungskraft der Erde von der Masse m des Körpers und der Fallbeschleunigung g abhängt. Bereits die Ortsabhängigkeit der Fallbeschleunigung weist aber darauf hin, dass die Gesetze der Erdanziehungskraft komplexer sind. Es war Isaac Newton, der als erster erkannte, dass dieselbe Kraft, die Körper zu Boden fallen lässt, auch zwischen den Himmelskörpern wie Sonne und Planeten wirkt und von der Masse der Körper verursacht wird.

Allgemein sprechen wir bei der Anziehung zwischen Massen von Gravitation. Die Kraft, mit der die Masse m_1 des einen Körpers die Masse m_2 des anderen Körpers anzieht, nennen wir die Gravitationskraft.

Die Gewichtskraft ist ein spezieller Fall der Gravitationskraft (vgl. auch Musteraufgabe auf S. 39). Beide Kräfte werden mit F_G bezeichnet.

Durch Gedankenexperimente (vgl. Methode S. 39) können wir die Gravitationskraft F_G erschließen: Ein Körper mit der Masse m_1 zieht einen Körper mit der Masse m_2 mit der Kraft F_1 an. Würden am Platz der Masse m_1 zwei oder n Körper mit der Masse m_1 sitzen, würden sie alle die Masse m_2 jeweils mit der Kraft F_1 anziehen. Also würde die gesamte Anziehungskraft auf m_2 auf den doppelten oder n-fachen Wert steigen. Die Anziehungskraft F_1 ist also direkt proportional zur Masse m_1: $F_1 \sim m_1$. Die gleiche Überlegung gilt natürlich auch umgekehrt für die Anziehungskraft F_2 der Masse m_2 auf die Masse m_1: $F_2 \sim m_2$.



B1 Anziehungskräfte zwischen zwei Massen.

Erläuterndes Beispiel:
Beim Kauf von Semmeln hängen die Kosten K von der Anzahl A und dem Einzelpreis p ab. Die Kosten steigen jeweils direkt proportional mit A und p:
$K \sim A$ und $K \sim p$.
Damit gilt dann auch:
$K \sim A \cdot p$
Hier gilt sogar das Gleichheitszeichen: $K = A \cdot p$

Daneben besagt das Wechselwirkungsgesetz von Newton, dass zwei Körper jeweils wechselseitig gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte ausüben. Folglich sind die beiden Anziehungskräfte F_1 und F_2 betragsmäßig gleich groß: $F_1 = F_2 = F_G$, mit der Abkürzung F_G nun für beide Kraftbeträge. Aus $F_G \sim m_1$ und $F_G \sim m_2$ folgt nun, dass der Kraftbetrag F_G direkt proportional zu beiden Massen m_1 und m_2 ist: $F_G \sim m_1 \cdot m_2$.

Die Gravitationskraft F_G eines Körpers auf andere Körper ist völlig unabhängig von der Richtung. Daher muss sich das Anziehungsvermögen einer Masse gleichmäßig auf die jeweilige Kugeloberfläche $O = 4\pi \cdot r^2$ im Abstand r zum Massenmittelpunkt verteilen. Verdoppeln, Verdreifachen oder ver-n-fachen wir nun den Abstand r, so wird sich die Kugeloberfläche vervierfachen, verneunfachen oder ver-n^2-fachen. Das gesamte Anziehungsvermögen der Masse auf der Kugeloberfläche bleibt jedoch gleich, deshalb verringert sich die Anziehungskraft F_G an einem bestimmten Punkt auf ein Viertel, ein Neuntel oder ein n^2-tel. Folglich gilt: $F_G \sim \frac{1}{O}$ oder $F_G \sim \frac{1}{4\pi \cdot r^2}$

Die Gewichtskraft ist auf der Erdoberfläche überall etwa gleich und damit unabhängig von der Richtung!

Wenn wir nur die Abhängigkeit der Größen betrachten wollen, können wir die Konstante 4π vernachlässigen. Wir können also vereinfacht schreiben: $F_G \sim \frac{1}{r^2}$.

Zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors müssten die Konstanten natürlich berücksichtigt werden!

B2 Gravitationskraft in verschiedenen Abständen zum Erdmittelpunkt.

Fassen wir alles zusammen, so erhalten wir für die Anziehungskraft F_G zwischen zwei Massen m_1 und m_2: $F_G \sim m_1 \cdot m_2 \cdot \frac{1}{r^2}$ oder $F_G \sim \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$. Um aus der direkten Proportionalität eine Gleichung zu machen, benötigen wir noch eine Proportionalitätskonstante. Wir nennen sie Gravitationskonstante G. Sie wird durch Präzessionsmessungen bestimmt, hier stößt unser Gedankenexperiment an seine Grenzen.

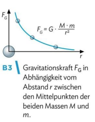
Zwei Körper mit den Massen m_1 und m_2 im Abstand r der Massenmittelpunkte üben wechselseitig jeweils eine Gravitationskraft $F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ aus. Die Gravitationskraft ist jeweils zum Mittelpunkt der anziehenden Masse gerichtet.
Für die Gravitationskonstante G gilt: $G = 6{,}674 \cdot 10^{-11} \, \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$.

Insbesondere bei einer sehr großen Masse M und einer kleineren Masse m schreibt man oft einfacher: $F_G = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$

Methode

Gedankenexperiment

Bei einem Gedankenexperiment stellen wir uns eine Situation wie in einem Experiment vor. Anschließend versuchen wir durch logische Überlegungen auf der Grundlage von Erfahrungstatsachen oder physikalischen Gesetzen Schlussfolgerungen zu ziehen und dadurch neue Erkenntnisse zu gewinnen. Durch technischen Fortschritt oder weitere physikalische Erkenntnisse kann es passieren, dass ein Gedankenexperiment Jahre später durch eine Simulation gestützt oder auch mit einem realen Experiment überprüft werden kann.



B3 \ Gravitationskraft F_G in Abhängigkeit vom Abstand r zwischen den Mittelpunkten der beiden Massen M und m.

Musteraufgabe

Die Gewichtskraft ist ein Spezialfall der Gravitationskraft. Berechnen Sie mithilfe des Ortsfaktors g und des Erdradius von 6370 km die Erdmasse.

Lösung

Die Gewichtskraft und die Gravitationskraft müssen auf der Erde gleich sein: $m \cdot g = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$.

Nach Division mit der Masse m ergibt das Auflösen:

$$M = \frac{g \cdot r^2}{G} = \frac{9{,}81 \, \frac{m}{s^2} \cdot (6370 \cdot 10^3 \, m)^2}{6{,}674 \cdot 10^{-11} \, \frac{m^3}{kg \cdot s^2}} \approx 5{,}96 \cdot 10^{24} \, kg$$

Erde:
Masse $M = 5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg
Mittlerer Radius $r = 6370$ km

Mond:
Masse $m = 7{,}349 \cdot 10^{22}$ kg
Mittlerer Radius $r = 1737$ km

Arbeitsaufträge

1 \ Erläutern Sie die direkte Proportionalität einer Größe mit einer (bzw. zwei) weiteren Größen an einem Alltagsbeispiel.

2 \ Eine Astronautin (62 kg) fliegt in 400 km Höhe um die Erde. Berechnen Sie die Gravitationskraft auf die Astronautin und vergleichen Sie mit der Gewichtskraft, die sie auf der Erde spüren würde.

3 \ Der Mond hat eine Masse von $7{,}349 \cdot 10^{22}$ kg und einen mittleren Radius von 1737 km. Berechnen Sie die Fallbeschleunigung auf der Mondoberfläche.

4 \ Asteroiden kommen der Erde teilweise gefährlich nahe. Um sie aus ihrer Bahn abzulenken, könnte eine massereiche Raumsonde zum Einsatz kommen, die so nahe wie möglich an den Asteroiden herangebracht wird und ihren Abstand dann beibehält. Recherchieren Sie den Begriff Gravitationstraktor. Erläutern Sie seine Funktionsweise und diskutieren Sie die Erfolgsaussichten.

weitere passende Aufgaben:
S. 42, Nr. 3, 6; S. 43, Nr. 15

5 \ Auf der Marsoberfläche herrscht eine Fallbeschleunigung von $3{,}7 \, \frac{m}{s^2}$ bei einer Marsmasse von $6{,}417 \cdot 10^{23}$ kg.
a) Berechnen Sie den mittleren Radius des Mars.
b) Erläutern Sie die Auswirkungen der geringen Fallbeschleunigung auf das Leben von Astronauten.
c) Auf dem Merkur herrscht an der Oberfläche dieselbe Fallbeschleunigung wie auf dem Mars, obwohl der Merkur rund die halbe Masse des Mars besitzt. Berechnen Sie den mittleren Radius des Merkurs in Bruchteilen des Marsradius.

Hilfestellung auf Seite 210-212

Bahngeschwindigkeiten

Die Planeten des Sonnensystems von innen nach außen: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun. Merkhilfe: „**M**ein **V**ater **e**rklärt **m**ir **j**eden **S**amstag **u**nseren **N**achthimmel."

Die Planeten unseres Sonnensystems bewegen sich, abgesehen von Merkur, auf nahezu kreisförmigen Bahnen. Gleiches gilt für den Erdmond. Daher können wir bei diesen Bewegungen in guter Näherung mit den Gesetzen der Kreisbewegung rechnen. Ebenso bewegen sich zahlreiche Satelliten auf Kreisbahnen um unsere Erde – insbesondere dann, wenn der gleichbleibende Abstand zur Erde für den Nutzungszweck wichtig ist.
Damit ein Planet nicht in die Sonne oder ein Satellit oder der Mond nicht auf die Erde stürzt, muss er sich mit der passenden Geschwindigkeit v auf seiner Kreisbahn mit Radius r um den Zentralkörper mit der Masse M bewegen. In dem Fall übernimmt die Gravitationskraft F_G die Rolle der Zentripetalkraft F_{Zp}, sodass die Gravitationskraft lediglich eine Richtungsänderung, aber keine Abstandsänderung zum Zentralkörper bewirkt. Daher gilt: $F_{Zp} = F_G$.
Die Bahngeschwindigkeit v erhalten wir, indem wir die jeweiligen Formeln einsetzen und nach v auflösen:

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$
$$\Rightarrow v^2 = G \cdot \frac{M}{r}$$
$$\Rightarrow v = \sqrt{G \cdot \frac{M}{r}}$$

Der Körper im Mittelpunkt bzw. Zentrum der Kreisbahn wird auch als Zentralkörper bezeichnet.

Ein Körper benötigt die Bahngeschwindigkeit $v = \sqrt{G \cdot \frac{M}{r}}$, damit er sich auf einer Kreisbahn mit Radius r um einen Zentralkörper mit der Masse M bewegt. Die Gravitationskraft wirkt dann als Zentripetalkraft: $F_{Zp} = F_G$

Alternativer Lösungsweg bei bekannter Bahngeschwindigkeit v: $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$ und $T = \frac{2\pi \cdot r}{v}$

Mit demselben Ansatz $F_{Zp} = F_G$ können wir auch eine Gleichung für die Umlaufdauer T ermitteln. Diesmal nutzen wir allerdings die Gleichung der Zentripetalkraft, die die Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{2\pi}{T}$ enthält: $m \cdot r \cdot \omega^2 = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \Rightarrow \omega^2 = G \cdot \frac{M}{r^3} \Rightarrow \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{G \cdot M}{r^3}$
Kehrwertbildung ergibt: $\frac{T^2}{4\pi^2} = \frac{r^3}{G \cdot M} \Rightarrow T^2 = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G \cdot M} \Rightarrow T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M}}$

Weder die Bahngeschwindigkeit v noch die Umlaufdauer T hängen dabei von der Masse m des Körpers auf der Kreisbahn ab.

Massenbestimmung

Aus der Bewegung von Objekten auf einer Kreisbahn um einen Zentralkörper können wir außerdem auf die Masse M des Zentralkörpers schließen. Sind der Abstand r zwischen den Massenmittelpunkten und die Bahngeschwindigkeit v oder aber die Umlaufdauer T des Körpers bekannt, können wir folgende Beziehungen aufstellen:
Aus $v^2 = G \cdot \frac{M}{r}$ folgt $M = \frac{r \cdot v^2}{G}$. Und aus $\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{G \cdot M}{r^3}$ ergibt sich $M = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{r^3}{T^2}$.

Die Kreisbahn von Himmelskörpern oder Satelliten lässt sich nutzen, um die Masse M des Zentralkörpers zu bestimmen. Dazu müssen neben dem Abstand r zwischen den Massenmittelpunkten auch die Bahngeschwindigkeit v oder aber die Umlaufdauer T bekannt sein.

Außer Merkur und Venus besitzen alle Planeten unseres Sonnensystems einen Mond.

Wenn ein Planet einen Mond besitzt, lässt sich die Planetenmasse leicht bestimmen, weil sich die Umlaufdauer und der Abstand des Monds astronomisch messen lassen.

Die Mondbahn als Kreisbahn – oder nicht?

Von der Erde aus betrachtet kreist der Mond um die Erde. In einem Bezugssystem mit der Sonne im Zentrum, kreist der Mond nahezu auf einer Kreisbahn um die Sonne. Durch den Einfluss der Erde liegt die Mondbahn jedoch einmal geringfügig innerhalb und dann wieder geringfügig außerhalb der Erdbahn (vgl. B1).



B1 \ Mondbahn im heliozentrischen Bezugssystem (Erde: blau, Mond: rot).

Methode

Einheitenbetrachtung

Ein wichtiges Hilfsmittel, um Ihre Rechnung zu kontrollieren, gerade wenn die Umformungen komplexer werden, bietet die sogenannte Einheitenbetrachtung. Dabei untersuchen wir bei einer Gleichung, ob wir auf beiden Seiten in der Gesamtbetrachtung dieselbe Einheit erhalten, wie folgendes Beispiel zeigt:

Bei $v = \sqrt{G \cdot \frac{M}{r}}$ gilt für die Geschwindigkeit v auf der linken Seite die Einheit $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Auf der rechten Seite erhalten wir: $[v] = \sqrt{\frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}}} = \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Bis auf Zahlenfaktoren scheinen damit die Umformungen korrekt zu sein.

Zur Erinnerung: Aus $F = m \cdot a$ folgt für die Einheiten: $1\,\text{N} = 1\,\text{kg}\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Die eckigen Klammern bei $[v]$ bedeuten, dass wir nur die Einheit der Größe v untersuchen, jedoch keine Zahlenwerte einsetzen!

Musteraufgabe

Geostationäre Satelliten bleiben bei ihrem Umlauf um die Erde jeweils über demselben Ort am Äquator und besitzen damit auch für nördlich oder südlich gelegene Orte eine dauerhaft feste Position. Berechnen Sie die Höhe dieser Satelliten über der Erdoberfläche.

Lösung

Der Satellit muss dieselbe Winkelgeschwindigkeit ω wie die Erde besitzen. Das bedeutet eine Umlaufdauer $T = 24$ h um die Erde mit Masse $M = 5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg.

Die Zentripetalkraft wird wieder durch die Gravitationskraft aufgebracht: $F_{Zp} = F_G$.

$m \cdot r \cdot \omega^2 = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \Rightarrow r^3 = G \cdot \frac{M}{\omega^2} = \frac{G}{4\pi^2} \cdot M \cdot T^2$.

Also: $r = \sqrt[3]{\frac{G}{4\pi^2} \cdot M \cdot T^2} = 42\,245 \cdot 10^3$ m.

Mit dem mittleren Erdradius von 6370 km ergibt sich eine Flughöhe von

$h = 42\,245\text{ km} - 6370\text{ km} = 35\,875\text{ km} \approx 36 \cdot 10^3\text{ km}$.

Achtung: Zwischenergebnisse nicht zu grob runden, da sonst das Endergebnis ungenau wird!

Erde:
Masse $M = 5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg
Mittlerer Radius $r = 6370$ km

Mond:
Masse $m = 7{,}349 \cdot 10^{22}$ kg
Mittlerer Radius $r = 1737$ km

Arbeitsaufträge

1 \ Führen Sie zu allen in Kap. 3.2 hergeleiteten Gleichungen die zugehörige Einheitenbetrachtung durch.

2 \ Vor der ersten Mondlandung 1969 umkreisten die Astronauten in rund 111 km Höhe den Mond. Berechnen Sie mit der Mondmasse von $7{,}349 \cdot 10^{22}$ kg und dem mittleren Mondradius von 1737 km die nötige Bahngeschwindigkeit der Apollo-11-Mission.

3 \ Der Jupitermond Europa umkreist den Planeten Jupiter in 3,551 d bei einem Mittelpunktsabstand von $671 \cdot 10^3$ km. Berechnen Sie die Masse Jupiters und den Mittelpunktsabstand des Mondes Io, der in 1,769 d den Jupiter umkreist. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit recherchierten Werten und beurteilen Sie die Modellierung mit Kreisbahnen.

4 \ Zeigen Sie, dass für alle Körper auf einer Kreisbahn um einen Zentralkörper der Term $\frac{T^2}{r^3}$ konstant ist.

weitere passende Aufgaben:
S. 42, Nr. 2, 4, 5, 8; S. 43, Nr. 10, 11, 16, 17; S. 44, Nr. 19, 20

Hilfestellung auf Seite 210-212

Vermischte Aufgaben

Basisaufgaben

1 Ein Auto (Masse $m = 1{,}2$ t) fährt bei trockener Fahrbahn mit der Geschwindigkeit $v = 90\ \frac{km}{h}$ entlang einer Linkskurve. Die Kurve ist kreisförmig mit einem Radius von $r = 110$ m.

a) Nennen Sie die Kraft, die dafür sorgt, dass das Auto nicht „aus der Kurve getragen" wird.

b) Berechnen Sie den Betrag dieser Kraft bei der Kurvenfahrt und zeichnen Sie in einer Skizze die Richtung der Kraft ein.

c) Bei Nässe beträgt die maximale Zentripetalkraft aufgrund der verminderten Reibung nur noch 3,9 kN. Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit soll im Bereich der Kurve eine Geschwindigkeitsbegrenzung bei Nässe auf 80 $\frac{km}{h}$ eingerichtet werden. Beurteilen Sie die Maßnahme.

2 a) Erklären Sie, was man unter einem geostationären Satelliten versteht.

b) Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit der Erde um ihre Rotationsachse.

c) Berechnen Sie den Abstand h der Umlaufbahn des geostationären Satelliten von der Erde. Leiten Sie dafür zunächst mithilfe eines Kraftansatzes eine passende Formel her.

d) Berechnen Sie die Bahngeschwindigkeit des geostationären Satelliten.

3 Berechnen Sie, wie sich der Betrag der Gravitationskraft zwischen zwei Massepunkten m_1 und m_2 bei Verdopplung (Verdreifachung) der Größe r verändert. Interpretieren Sie in Worten, was das anschaulich für die Massepunkte bedeutet.

4 Der Marsmond Phobos (griech. *Furcht*) bewegt sich innerhalb von 7,65 h mit einem Bahnradius von 9378 km einmal um den Mars. Berechnen Sie aus diesen Angaben unter Nutzung des Gravitationsgesetzes die Masse des Mars.

5 Die GPS-Satelliten umkreisen die Erde ($m_E = 5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg; $r_E = 6370$ km) in einer Höhe von 20 200 km über dem Erdboden.

a) Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit der Satelliten.

b) Berechnen Sie die Dauer, die die Satelliten für einen vollständigen Umlauf benötigen.

6 Für einen Gegenstand auf der Erdoberfläche wird die Gravitationskraft bekanntermaßen wie folgt angegeben: $F_G = m \cdot g$

a) Bestimmen Sie mithilfe des Gravitationsgesetzes den Wert für g auf Meereshöhe.

b) Berechnen Sie die Kraft, die aufgrund von Gravitation zwischen Ihnen und Ihrer Nachbarin oder Ihrem Nachbarn wirkt.

c) Die tiefste frei zugängliche Stelle der Erdoberfläche liegt am Toten Meer bei −400 m, Linienflugzeuge fliegen bis zu einer Höhe von 10 000 m über der Erde. Geben Sie den Unterschied zwischen den entsprechenden Ortsfaktoren in Prozent an.

7 Der flotte Felix entscheidet sich auf der Fürther Kerwa für eine rasante Fahrt in der Achterbahn. Die Looping-Bahn enthält eine Schleife, die als Kreis mit dem Radius $r = 5{,}1$ m geformt ist. Der Wagen startet aus der Ruhe heraus in einer Anfangshöhe h_a derart, dass der Wagen im höchsten Punkt der Schleife die Bahn gerade noch nicht verlässt und nicht herunterfällt.



a) Bestimmen Sie die Bahngeschwindigkeit des Wagens im höchsten Punkt der Schleife, wenn die Reibung vernachlässigt wird.

b) Berechnen Sie die Höhe h_a aus der der Wagen zu Beginn der Fahrt gestartet ist.
Hinweis: Nutzen Sie als Ansatz die Energieerhaltung!

c) Berechnen Sie die Geschwindigkeit im tiefsten Punkt der Schleife.

8 Ein Wettersatellit soll die Erde 10-mal pro Tag umrunden (ohne Berücksichtigung der Erdrotation).

a) Bestimmen Sie die Winkelgeschwindigkeit ω dieser Kreisbewegung.

b) Berechnen Sie die Satellitenhöhe über der Erdoberfläche ($m_E = 5{,}96 \cdot 10^{24}$ kg; $r_E = 6370$ km).

9 \ Beim Verkaufsgespräch über eine neue Waschmaschine sagt der Verkäufer, beim Schleudervorgang würde das Wasser aus der nassen Kleidung durch die Zentrifugalkraft radial nach außen geschleudert werden. Klären Sie ihn unter Nutzung physikalischer Fachbegriffe auf.

10 \ Beschreiben Sie eine realistische Möglichkeit zur Bestimmung der Erdmasse ohne dabei bereits bekannte Größen wie den Ortsfaktor zu nutzen. Geben Sie dazu die Größen an, die gemessen werden bzw. die bekannt sein müssen. Schreiben Sie dann einen physikalischen Rechenansatz auf, aus dem man m_{Erde} berechnen kann. Die Rechnung selbst muss nicht ausgeführt werden.

11 \ Im Jahr 1609 entdeckten Galileo Galilei in Padua und unabhängig davon Simon Marius in Gunzenhausen vier Monde, die den Planeten Jupiter umkreisen. Der größte Mond heißt heute Ganymed; er ist 1070600 km vom Mittelpunkt Jupiters entfernt und braucht für einen Umlauf 7,16 Tage.



Berechnen Sie aus diesen Daten sowie dem Wert für die Gravitationskonstante ($G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\frac{m^3}{kg \cdot s^2}$) die Masse des Jupiters.

12 \ Eine Spinne befindet sich auf einer Schallplatte, die auf dem Drehteller eines alten Plattenspielers rotiert. Sie hält sich am Rand der Schallplatte fest, während der Drehteller mit 78 rpm (Umdrehungen pro Minute) rotiert. Der Radius der Schallplatte beträgt 15 cm.

a) Berechnen Sie die Bahngeschwindigkeit der Spinne.

b) Bestimmen Sie die Haftkraft, mit der sich die Spinne am Rand der Schallplatte festhalten muss, um nicht fortgeschleudert zu werden. Die Masse der Spinne beträgt 1,0 g.

c) Beschreiben Sie die Änderung der Kraft, wenn sich die Spinne langsam auf die Mitte der Schallplatte zubewegt.

d) Bewerten Sie, ob Sie ein solches Experiment mit einer realen Spinne für vertretbar halten.

13 \ Ein 1,20 kg schwerer Pendelkörper schwingt an einem 1,00 m langen Seil mit einer Höchstgeschwindigkeit von 2,50 $\frac{m}{s}$. Berechnen Sie die Gesamtkraft, die auf das Seil ausgeübt wird, wenn sich der Pendelkörper am unteren Ende der Schwingung befindet.

14 \ Ein Kind mit einer Masse von 25 kg schwingt mit einem Radius von 2,0 m sitzend auf einer Schaukel. Am tiefsten Punkt erreicht das Kind eine Geschwindigkeit von 20 $\frac{km}{h}$. Berechnen Sie die Zentripetalkraft, die die Schaukelseile auf das Kind ausüben müssen, und die Gesamtkraft, die auf die Seile wirkt.

15 \ Die Gravitationskraft zwischen Erde und Mond ist in etwa nur halb so groß wie die Gravitationskraft zwischen Sonne und Mond. Begründen Sie, dass der Mond trotzdem nicht von der Erde weg in Richtung Sonne gezogen wird.

16 \ Begründen Sie, ob eine Rakete bei einem Start in Richtung Westen eine höhere Startgeschwindigkeit benötigt oder bei einem Start in Richtung Osten. Berücksichtigen Sie in Ihrer Argumentation die Richtung der Erdrotation.



17 \ Berechnen Sie die Dauer eines Tags, wenn die Erde so schnell rotieren würde, dass Gegenstände am Äquator schwerelos erscheinen würden.

18 \ Sie schwingen einen Stein ($m = 0{,}80$ kg) an einem 1,50 m langen Seil horizontal im Kreis. Ein vollständiger Umlauf dauert 0,80 s.

a) Berechnen Sie die Bahngeschwindigkeit, die Winkelgeschwindigkeit und die Zentripetalbeschleunigung des Steins.

b) Erklären Sie, dass Sie am Seil ziehen müssen, um den Stein in Rotation zu halten.

c) Versetzen Sie sich in das Bezugssystem des Steins. Erklären Sie die Kraft, die auf den Stein wirkt.

Zusammenfassende Aufgaben

19 \ Der Jupiter

Der Jupiter (Masse $M_J = 1{,}90 \cdot 10^{27}$ kg; Radius $r_J = 69\,900$ km) ist der größte Planet unseres Sonnensystems.

Er wird nach aktueller Forschung von 95 Monden umkreist. Die vier größten Monde hat bereits Galileo Galilei im 17. Jahrhundert mithilfe eines Teleskops entdeckt.

a) Zur Erforschung des Jupiters wurde 2011 die Jupitersonde Juno gestartet. Sie befindet sich seit 2016 auf einer elliptischen Umlaufbahn um den Jupiter. Ihre Umlaufdauer beträgt 1280 h. Berechnen Sie die Höhe der Sonde auf einer Kreisbahn über dem Planeten Jupiter. Recherchieren Sie die tatsächliche Umlaufbahn und Höhe der Sonde.



b) Erklären Sie das Vorgehen, um durch die Beobachtung der Monde die Masse des Jupiters zu bestimmen. Nennen Sie die Größen, die man dazu wissen bzw. bestimmen muss, und geben Sie die benötigten physikalischen Formeln an.

20 \ James-Webb-Teleskop

Das James-Webb-Weltraumteleskop wurde 2020 in den Weltraum befördert. Dort läuft es im sogenannten Lagrange-Punkt L_2 um die Sonne, was die Skizze veranschaulicht (nicht maßstabsgerecht). Der Punkt L_2 liegt – von der Sonne aus gesehen – 1,5 Mio. km hinter der Erde. Das Besondere daran: Befindet sich das Teleskop dort, bewegt es sich mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit um die Sonne wie die Erde.

Erklären Sie, wie es physikalisch möglich ist, dass sich das Webb-Teleskop in L_2 in der gleichen Zeit um die Sonne dreht wie die Erde, obwohl es doch viel weiter von der Sonne entfernt ist.



21 \ Kurvenfahrt auf der Autobahn

Für den Bau eines Autobahnkreuzes soll der Kurvenradius einer Ausfahrt berechnet werden. Auf nassem Asphalt gilt die Faustregel, dass die Haftreibungskraft nur maximal 60 % der Gewichtskraft beträgt.

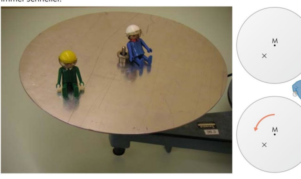
a) Berechnen Sie auf Grundlage dieser Faustregel den Kurvenradius für eine Autobahnausfahrt, in der die Autos eine Geschwindigkeit von 60 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ besitzen. (Hinweis: Wenn Sie sie benötigen, können Sie eine beliebige Masse für das Auto annehmen.)

b) Wenn die Geschwindigkeit eines Autos zu hoch für die Kurve ist, rutscht es aus der Kurve. Skizzieren Sie die gewollte und tatsächliche Bahn eines solchen Autos. Entscheiden Sie, wo Kräfte auf das rutschende Auto wirken, und zeichnen Sie diese in die Skizze ein.



22 \ Maja und Willi auf dem Teufelsrad

Maja und Willi sitzen wie in der Abbildung auf dem Teufelsrad. Willi sitzt 2,5 m von der Drehachse entfernt, Maja 1,0 m. Jetzt beginnt sich das Rad langsam zu drehen und wird immer schneller.

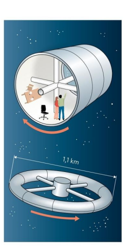


a) Begründen Sie, wer zuerst vom Rad rutscht, und bestimmen Sie die Winkelgeschwindigkeit, bei der das geschieht. Nehmen Sie an, dass die (Haft-)Reibungskraft bei beiden jeweils 70 % ihrer Gewichtskraft beträgt.

b) Übertragen Sie die beiden dargestellten Kreise ins Heft. Zeichnen Sie dort die Bahn ein, die eine bei der markierten Stelle vom Rad rutschende Person beschreibt: oben von der Scheibe aus gesehen, unten aus Sicht eines Zuschauers außerhalb des Karussells.
Nehmen Sie dabei zur Vereinfachung an, dass nach dem Losrutschen keine Reibungskräfte mehr wirken.

23 \ Futuristische Raumstationen

Astronauten, die sich lange Zeit im Weltraum befinden, erfahren negative körperliche Auswirkungen aufgrund der fehlenden Gravitation. Es gibt jedoch eine Möglichkeit, die Gravitation zu simulieren: Die Raumstation wird als sich drehender Zylinder gebaut, auf dessen Innenseite die Astronauten laufen können.



a) Erklären Sie das Prinzip dieser Art der Gravitationssimulation.

b) Beschreiben und begründen Sie im oberen Bildteil, auf welche Weise Gegenstände zu Boden fallen, und was Astronauten spüren, wenn Sie auf einer Leiter in Richtung Mitte "nach oben" klettern.

c) Eine zukünftige Raumstation wird als kreisförmige Röhre mit einem Radius von 1,1 km geplant (unterer Bildteil). Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit (in Umdrehungen pro Tag), die eine solche Raumstation besitzen muss, um eine Fallbeschleunigung wie auf der Erde zu simulieren.

Selbsttest: Überprüfen Sie Ihre Kenntnisse und Kompetenzen selbst

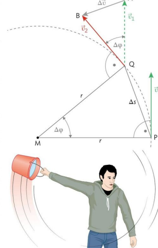


Selbsttest-Checkliste

- ✓ Bearbeiten Sie die Aufgaben schriftlich in ordentlicher Form. Die Auswertungstabelle zeigt die Kompetenzerwartungen und Hilfestellungen.
- ✓ Vergleichen Sie Ihre Lösungen mit den Lösungsskizzen auf Seite 194-197.
- ✓ Bewerten Sie nun Ihre Lösungen selbst mit den Symbolen ☺, 😐 oder ☹.

1 a) Erstellen Sie eine Gegenüberstellung der analogen Größen einer geradlinigen Bewegung und einer Kreisbewegung. Gehen Sie dabei insbesondere auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede ein.
b) Erklären Sie das Zustandekommen von Kreisbewegungen.
c) Der Rotor eines Hubschraubers (Radius des Rotors $r = 8{,}0$ m) drehe sich 300-mal in einer Minute. Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit des Rotors sowie die Bahngeschwindigkeit der Rotorspitze.

2 a) Bei nebenstehender Abbildung sind die beiden Dreiecke *MPQ* und *QAB* ähnlich zueinander.
Folglich gilt folgende Beziehung: $\frac{\Delta s}{r} = \frac{\Delta v}{v}$
Leiten Sie damit die Formel für die Zentripetalkraft $F_{Zp} = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot r \cdot \omega^2$ her.
b) Erläutern Sie den Unterschied zwischen der Zentripetalkraft und der Zentrifugalkraft.
c) Man kann einen Eimer mit Wasser so schnell mit dem Arm rotieren, dass selbst bei senkrechter Rotationsebene kein Wasser aus dem Eimer herausläuft. Berechnen Sie die dafür mindestens notwendige Rotationsfrequenz sowie die Bahngeschwindigkeit des Eimers, wenn die Länge von der Schulter bis zum Schwerpunkt des Wassers 1,20 m beträgt.



3 Sie haben im Schülerexperiment einen Versuch zur Abhängigkeit der Zentripetalkraft von verschiedenen Größen geplant und durchgeführt.
a) Benennen Sie die Größen, von denen die Zentripetalkraft abhängt und bei denen man diese Abhängigkeit experimentell untersuchen kann.
b) Beschreiben Sie den Aufbau und die Durchführung eines solchen Experiments. Erläutern Sie insbesondere, inwiefern das Experiment relevant für das Überprüfen einer zuvor aufgestellten Hypothese ist.
c) Nennen Sie Möglichkeiten des Einsatzes von elektronischen Sensoren beim Experiment.

4 a) Nennen Sie Beispiele für Kreisbewegungen im Alltag und in der Technik und identifizieren Sie jeweils die für die Bewegung notwendige Zentripetalkraft.

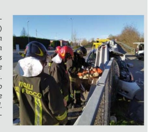
b) Erläutern Sie, dass für eine Kurvenfahrt eines Autos die Haftreibungskraft F_H die Zentripetalkraft darstellt. Zeigen Sie damit, dass für die maximale Geschwindigkeit, mit der ein Auto eine Kurve mit Radius r durchfahren kann, folgender Zusammenhang gilt:

$v = \sqrt{\mu \cdot g \cdot r}$

c) Ein Zeitungsartikel:

Unfall mit Sachschaden

Vermutlich überhöhte Geschwindigkeit war die Ursache eines Verkehrsunfalls. Der Wagen von Peter P. (18) kam auf regennasser Fahrbahn in einer Linkskurve von der Straße ab und prallte gegen die Leitplanke. Zum Glück wurde niemand verletzt, am Auto ist allerdings ein Totalschaden entstanden. Die Feuerwehr musste das Auto mit schwerem Gerät aus der Bande befreien. „Ich kann mir den Unfall überhaupt nicht erklären", so Peter P. bei der Polizei. „Ich kenne die Kurve, ich fahre diese Strecke in dieser Woche bereits zum dritten Mal. Außerdem habe ich die vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit von 80 $\frac{km}{h}$ nicht überschritten."



Stellen Sie sich vor, Sie kennen die im Text genannte Kurve und Peter P. wäre ein Freund von Ihnen. Schreiben Sie ihm eine E-Mail, in der Sie ihm unter Verwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten mögliche Gründe für seinen Unfall darlegen.

5 a) Leiten Sie unter der Annahme, dass sich ein Himmelskörper der Masse m auf einer Kreisbahn um den Zentralkörper der Masse M bewegt, die folgende Formel her:

$m \cdot r \cdot \omega^2 = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$

b) Die internationale Raumstation ISS umkreist die Erde in einer durchschnittlichen Höhe von etwa 400 km über der Erdoberfläche.
Berechnen Sie die Dauer eines Umlaufs der ISS um die Erde.
Nennen Sie Auswirkungen, die eine größere Höhe der ISS über der Erdoberfläche hätte.

Auswertungstabelle

	Ich kann…	Hilfe
1	durch Analogiebetrachtung die Größen der geradlinigen Bewegung auf die Kreisbewegung übertragen und das Zustandekommen von Kreisbewegungen erklären.	S. 12 ff
2	die Formel für die Zentripetalkraft herleiten, die Zentripetalkraft von der Zentrifugalkraft abgrenzen und Berechnungen zur Kreisbewegung durchführen.	S. 20 ff
3	ein geeignetes Experiment zur Überprüfung des Terms für die Zentripetalkraft planen und unter Verwendung von elektronischen Sensoren durchführen.	S. 30/31
4	quantitative Betrachtungen zu Kreisbewegungen in Alltag und Technik durchführen, die jeweilige Zentripetalkraft identifizieren und kritische Situationen im Straßenverkehr auf der Grundlage physikalischer Gegebenheiten bewerten.	S. 32 ff
5	mithilfe des Gravitationsgesetzes die Bewegung von Himmelskörpern und Satelliten als Kreisbewegung modellieren.	S. 36 ff

Zusammenfassung

geradlinige Bewegungen

Für eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit v_0 gelten folgende Funktionen für die Beschleunigung $a(t)$, die Geschwindigkeit $v(t)$ und den Ort $x(t)$:

$a(t) = 0; v(t) = v_0; x(t) = v_0 \cdot t$

Die Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit stellt im t-x-Diagramm eine Gerade dar.

Für eine Bewegung mit konstanter Beschleunigung gilt für $v_0 = 0$ und $x_0 = 0$:

$a(t) = a; v(t) = a \cdot t; x(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$

Konstant beschleunigte Bewegungen werden im t-x-Diagramm als Parabeln und im t-v-Diagramm als Geraden dargestellt.

Kreisbewegungen

Kreisbewegung: Ein Körper bewegt sich auf einer Kreisbahn mit Radius r um einen im Bezugssystem festen Mittelpunkt M.
Umlaufdauer einer Kreisbewegung: T
Frequenz einer Kreisbewegung: f

Einheit von T: 1 s
Einheit von f: $1\frac{1}{s} = 1\,s^{-1} = 1\,Hz = 1$ Hertz

Die Bahngeschwindigkeit v ist die Geschwindigkeit, mit der sich der Körper auf der Kreisbahn bewegt. Für ihren Betrag gilt:

$v = \frac{b}{\Delta t} = \frac{2\pi r}{T}$

b: in der Zeitspanne Δt zurückgelegter Kreisbogen

Winkelgeschwindigkeit einer Kreisbewegung, wobei $\Delta\varphi$ der in der Zeit Δt überstrichene Winkel ist

$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$

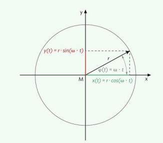
Einheit von ω: $1\frac{1}{s} = 1\,s^{-1}$

Zusammenhang zwischen Winkel- und Bahngeschwindigkeit:

$v = \frac{2\pi}{T} \cdot r = \omega \cdot r$

Die Koordinatendarstellung eines Körpers auf einer Kreisbahn mit Radius r lautet:

$x(t) = r \cdot \cos(\omega t); y(t) = r \cdot \sin(\omega t)$



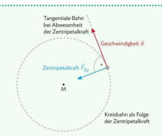
Die x- und y-Komponenten der Bahngeschwindigkeit v berechnen sich zu:

$v_x(t) = v \cdot \sin(\omega t); v_y(t) = v \cdot \cos(\omega t)$

Zentripetalkraft

Die Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$ ist die Ursache für eine Kreisbewegung und zeigt immer vom Körper aus in Richtung Mittelpunkt der Kreisbewegung.
Damit ein Körper eine gleichförmige Kreisbewegung ausführen kann, muss auf ihn zu jeder Zeit eine zum Kreismittelpunkt hin gerichtete Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$ wirken. Dabei erfährt der Körper die Zentripetalbeschleunigung $\vec{a}_{Zp}$. Die Zentripetalkraft hat den konstanten Betrag

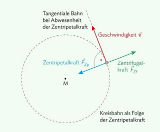
$$F_{Zp} = m \cdot a_{Zp} = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot r \cdot \omega^2$$



Zentrifugalkraft und Scheinkräfte

In ruhenden oder gleichförmig bewegten Bezugssystemen gilt stets der Trägheitssatz, ohne eine äußere Kraft ändert sich der Bewegungszustand eines Körpers nicht. Ein solches System wird als Inertialsystem bezeichnet.
In beschleunigten Bezugssystemen wirken Scheinkräfte, die von der Beschleunigung des Systems abhängen und ihre Ursache in der Trägheit der Massen haben.
Die Zentrifugalkraft $\vec{F}_{Zf}$ ist eine im rotierenden Bezugssystem auftretende Scheinkraft, die ihre Ursache in der Trägheit des Körpers hat. Sie ist der Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$ entgegengerichtet, also stets vom Mittelpunkt nach außen. Ihr Betrag entspricht aber dem der Zentripetalkraft:

$$F_{Zp} = F_{Zf} = m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot \frac{v^2}{r}$$



Gravitationsgesetz

Allgemein sprechen wir bei der Anziehung zwischen Massen von Gravitation. Die Kraft, mit der die Masse m_1 des einen Körpers die Masse m_2 des anderen Körpers anzieht, nennen wir Gravitationskraft. Haben die beiden Körper den Abstand r voneinander, so lautet die wechselseitig ausgeübte Gravitationskraft, die jeweils zum Mittelpunkt der Massen gerichtet ist:

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

Damit ein Körper sich auf einer Kreisbahn mit dem Radius r um einen Zentralkörper der Masse M bewegt, benötigt er folgende Bahngeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{G \cdot \frac{M}{r}}$$

In dem Fall gilt: $F_{Zp} = F_G$

Gravitationskonstante G:
$G = 6{,}674 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$
Über die Kreisbahn eines Satelliten lässt sich so die Masse eines Himmelskörpers bestimmen.

B \ Schwingungen und Wellen

Gleichgewichtslage Federpendel
Amplitude *t-s*-Diagramm Rückstellkraft
Federkonstante harmonische Schwingung
Messunsicherheit Longitudinalwelle Standardabweichung
Wellenlänge Transversalwelle
Wellenfront stehende Welle Phasenverschiebung
Superpositionsprinzip Huygenssches Prinzip
Interferenz Elementarwelle
Doppelspalt Gangunterschied
Photonenmodell Ausbreitungsgeschwindigkeit

Sie können in diesem Kapitel entdecken ...

- wie Sie Diagramme zu verschiedenen schwingungsfähigen Systemen anhand der charakteristischen Größen beschreiben und interpretieren.
- wie Sie ein Experiment zur Bestimmung der Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von verschiedenen Größen planen, durchführen und graphisch auswerten. Auch die Messunsicherheit einer mehrfach gemessenen Größe unter Verwendung statistischer Kenngrößen lernen Sie zu quantifizieren.
- wie Sie Longitudinal- und Transversalwellen identifizieren und die Ausbreitung mechanischer Wellen beschreiben.
- wie Sie Beugung und Interferenz bei Wellen erklären und das Zustandekommen von konstruktiver und destruktiver Interferenz bei zwei Wellenzentren mithilfe des Wegunterschieds begründen.
- wie Sie das Schirmbild von monochromatischem Licht am Doppelspalt mithilfe des Wellenmodells des Lichts interpretieren und einen Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge des Lichts formulieren.
- wie Sie das Photonen- und das Wellenmodell des Lichts voneinander abgrenzen.

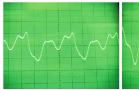
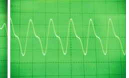


4 Mechanische Schwingungen

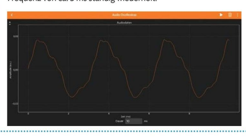
Versuche und Materialien zu Kapitel 4.1

M1 Lernaufgabe: Schwingungen in der Akustik

Schall wird durch die Luft übertragen, indem die einzelnen Moleküle periodische Bewegungen vollführen. Man spricht auch von Schwingungen der Luftmoleküle. Der Ursprung dafür ist die Bewegung einer Schallquelle, wie z. B. der Stimmbänder beim Menschen, einer Gitarrensaite oder der Membran eines Lautsprechers. Im Falle eines Basslautsprechers lassen sich diese Schwingungen sogar direkt mit den Fingern fühlen. Die Wahrnehmung des Schalls erfolgt ebenfalls über die mechanische Schwingung eines Gegenstands: des Trommelfells im menschlichen Ohr oder einer Membran in einem Mikrofon. Im letzteren Fall wird die mechanische Schwingung in eine elektrische umgewandelt und wir können sie mit einem Oszilloskop untersuchen. Die folgenden Abbildungen zeigen Beispiele dazu:

Grundsätzlich lassen sich akustische Schwingungen aber mit allen Gerätschaften untersuchen, die ein Mikrofon enthalten. So existieren für Handys und Tablets eine ganze Reihe von Programmen, die es erlauben, akustische Signale darzustellen. Unten ist beispielsweise ein periodisches Signal dargestellt, das sich mit einer Frequenz von ca. 3 ms ständig wiederholt.



Arbeitsauftrag

a) Machen Sie sich mit einem Programm zur Untersuchung akustischer Signale vertraut, zum Beispiel mit der über den Mediencode hinterlegten kostenlosen App (dort heißt die passende Anwendung „Audio Oszilloskop“). MC 67051-04

b) Nehmen Sie mit dem Programm Tonbeispiele unterschiedlicher Art auf (z. B. Klang eines Musikinstruments; Geräusch eines Fahrzeugs; Frequenzgenerator) und klassifizieren Sie diese nach der Art des erhaltenen Diagramms.

c) Variieren Sie in den Beispielen die Tonhöhe und die Lautstärke und beschreiben Sie die Veränderungen in den Diagrammen. Benennen Sie die charakteristischen Größen und geben Sie jeweils die musikalische Entsprechung an.

d) Recherchieren Sie Zahlenwerte und physikalische Einheiten, die den Tönen der C-Dur-Tonleiter in der temperierten Stimmung zugeordnet sind.

e) Nehmen Sie den Ton einer Stimmgabel auf und den gleichen Ton von einem Musikinstrument. Beschreiben Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede der jeweiligen Diagramme.

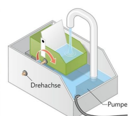
Versuche und Materialien zu Kapitel 4.2

M2 Lernaufgabe: Besondere Schwingungen

Mechanische Schwingungen lassen sich in verschiedene Klassen einteilen. Das soll hier genauer untersucht werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen ein Wasserpendel: Durch eine Pumpe wird Wasser aus einem Reservoir in ein Gefäß gepumpt, das auf einer Achse drehbar gelagert ist. Bei kleinen Wassermengen sorgt die Gewichtskraft des linken Gefäßteils (zusammen mit kleinen Wassermengen links) dafür, dass die Lage stabil ist. Wenn jedoch die Wassermenge im rechten Teil einen bestimmten Wert überschreitet, dann kippt das Gefäß und entleert sich wieder in das Reservoir. Anschließend kehrt das Gefäß in seine Gleichgewichtslage zurück und die Bewegung beginnt von Neuem.





Alte Standuhren werden meist durch einen Pendelkörper betrieben; hier ist die Regelmäßigkeit der Bewegung entscheidend für die Genauigkeit der Uhr. Eine stark vereinfachte Form eines Uhrenpendels stellt das Fadenpendel dar. Gerade wegen seiner Einfachheit wird es für viele Anwendungen in der Physik genutzt. Das Gleiche gilt für das Federpendel, das zudem auch ein beliebtes Spielzeug ist.



Arbeitsauftrag

a) Beschreiben Sie die Bewegung des Wasserpendels mit Worten. Zeichnen Sie dann ein Diagramm, das die Position eines Punktes des drehbaren Gefäßes (z. B. des im ersten Foto markierten Punktes) als Funktion der Zeit darstellt.

b) Unter dem folgenden QR-Code finden Sie eine Filmaufnahme des Wasserpendels. Überprüfen Sie Ihre Lösung aus a), indem Sie die Bewegung mit einem Programm zur Videoanalyse auswerten. MC 67051-05

c) Ein Fadenpendel und ein Federpendel lassen sich sehr einfach selbst herstellen. Filmen Sie für beide Pendelarten die Bewegungen und erstellen Sie mit einer Videoanalyse das entsprechende *t*-*s*-Diagramm.

d) Beschreiben Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Diagrammen aus b) und c).

e) Mit der Videoanalyse können Sie auch den Verlauf der Geschwindigkeiten darstellen. Führen Sie das für die untersuchten Pendelarten durch. Erklären Sie den Verlauf des *t*-*v*-Diagramms mit dem zugehörigen *t*-*s*-Diagramm.

Vergleich: Periodische Bewegung – mechanische Schwingung

Die nachfolgenden Bilder zeigen links das Riesenrad auf dem Wiener Prater, rechts eine Schiffschaukel auf einem Jahrmarkt.





B1 Links: Riesenrad – eine periodische Bewegung. Rechts: Schiffschaukel – eine Schwingung.

Betrachten wir eine bestimmte Gondel des Riesenrads, so stellen wir fest, dass sich die Gondel nach einem vollständigen Umlauf wieder im exakt gleichen Zustand befindet und wieder die exakt gleiche Bewegung vollführt.
Analoges gilt für die Schiffschaukel: Nach einer vollständigen Bewegung nach links und rechts (d. h. nach einer vollständigen Schwingung) befindet sich die Schaukel wieder im exakt gleichen Zustand und beginnt wieder die exakt gleiche Bewegung.
Beide Bewegungen sind Beispiele für sogenannte periodische Bewegungen. Nach einem vollständigen Durchlaufen der Bewegung beginnt die exakt gleiche Bewegung von vorne.

Der Begriff der mechanischen Schwingung

Eine Schwingung ist ein Spezialfall einer periodischen Bewegung. Bei einer Schwingung bewegt sich ein Gegenstand zwischen zwei Umkehrpunkten hin und her.
Beispiele für mechanische Schwingungen sind ein Fadenpendel, ein Federpendel, eine Stimmgabel, eine schwingende Gitarrensaite, aber auch eine sich dauernd auf und ab bewegende Wassersäule in einem U-Rohr.



B2 Beispiele für mechanische Schwingungen: Fadenpendel, Federpendel, Stimmgabel, Gitarrensaite, wassergefülltes U-Rohr.

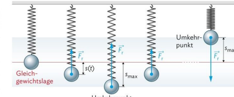
Gemeinsam ist diesen Beispielen, dass es eine stabile Ruhelage („Gleichgewichtslage") gibt. Wenn das System von außen „gestört" wird, entwickelt es sich wieder auf diese Ruhelage zu, läuft aber über diese hinaus bis zu einem Umkehrpunkt. Von dort aus bewegt sich das System zurück bis es wieder den Startpunkt erreicht hat. Erst jetzt wiederholt sich die Bewegung exakt, d. h. mit den gleichen Werten für Ort und Geschwindigkeit.

Eine mechanische Schwingung ist eine zeitlich periodische Bewegung eines Körpers um eine Gleichgewichtslage.

Damit ein Körper eine Schwingung vollführen kann, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:
- Es muss ein schwingungsfähiger Körper vorhanden sein.
- Der Körper muss aus seiner Gleichgewichtslage ausgelenkt werden.
- Es muss eine Kraft vorhanden sein, die den Körper in Richtung zur Gleichgewichtslage zurücktreibt („rücktreibende Kraft“ oder „Rückstellkraft“).

Charakteristische Größen einer mechanischen Schwingung

Betrachten wir das Federpendel etwas genauer: Ein Körper, z. B. eine Kugel, hängt an einer dehnbaren Schraubenfeder. Lenken wir die Kugel etwas aus der Gleichgewichtslage aus, so schwingt die Kugel periodisch um die Gleichgewichtslage zwischen zwei Umkehrpunkten hin und her. Die Federkraft stellt hier die rücktreibende Kraft dar.
Als Auslenkung $s(t)$ zum Zeitpunkt t wählen wir den Abstand der Kugel zur Gleichgewichtslage (vgl. B3).



B3 \ Die mechanische Schwingung eines Federpendels.

Die betragsmäßig größte Auslenkung von der Gleichgewichtslage bis zum Umkehrpunkt nennt man Amplitude s_{max}. Die Zeit für eine vollständige Schwingung heißt Schwingungsdauer (oder Periodendauer) T. Die Frequenz f gibt die Zahl der Schwingungen pro Zeiteinheit an. In der Tabelle sind die Größen mitsamt ihren Einheiten nochmal aufgelistet.

phys. Größe	Definition	Einheit
Auslenkung $s = s(t)$	Abstand zur Gleichgewichtslage zum Zeitpunkt t	1 m
Amplitude s_{max}	größte Auslenkung, d. h. maximaler Abstand zur Gleichgewichtslage	1 m
Schwingungsdauer T	Dauer für eine vollständige Schwingung	1 s
Frequenz f	Zahl der Schwingungen pro Sekunde	$\frac{1}{s}$ = 1 Hz (Hertz)

Die Einheit 1 Hz ist nach dem deutschen Physiker Heinrich Hertz (1857-1894) bezeichnet worden.

Will man die Schwingungsdauer T einer mechanischen Schwingung experimentell bestimmen, ist es oftmals günstiger (und präziser), nicht die Dauer einer einzelnen Schwingung zu messen, sondern die Dauer für mehrere Schwingungen und anschließend durch die Zahl der Schwingungen zu dividieren. Beträgt beispielsweise die Dauer für $n = 10$ Schwingungen $t = 12$ s, erhält man eine Schwingungsdauer $T = \frac{t}{n} = \frac{12\,s}{10} = 1{,}2$ s und eine Frequenz $f = \frac{n}{t} = \frac{10}{12\,s} = 0{,}83$ Hz.

Anhand dieses Beispiels lässt sich auch ein Zusammenhang zwischen Schwingungsdauer T und Frequenz f erkennen: $T = \frac{1}{f}$ bzw. $f = \frac{1}{T}$.

Zwischen der Schwingungsdauer T und der Frequenz f einer Schwingung besteht der Zusammenhang: $f = \frac{1}{T}$ bzw. $T = \frac{1}{f}$
Finden n Schwingungen in der Zeit t statt, dann gilt: $f = \frac{n}{t}$ bzw. $T = \frac{t}{n}$

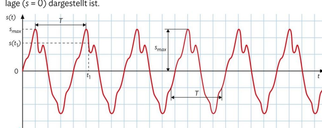
Oft werden größere Einheiten benötigt:
1 kHz = 100 Hz
1 MHz = 1 000 000 Hz
1 GHz = 1 000 000 000 Hz

Der Begriff der Frequenz findet in verschiedenen Bereichen Verwendung; neben den mechanischen Schwingungen beispielsweise in der Akustik, aber auch in der Elektrizitätslehre. Die Tabelle zeigt die Frequenzen einiger typischer Schwingungen.

Typische Schwingungen in Natur und Technik	Frequenz
1 m langes Fadenpendel	0,5 Hz
Herzschlag des Menschen	1,3 Hz
tiefster vom Menschen hörbarer Ton	16 Hz
Flügelschlag einer Hummel	200 Hz
Kammerton a	440 Hz
normales Sprechen	100 – 1000 Hz
höchster vom Menschen hörbarer Ton	20 000 Hz
Ultraschall	über 20 000 Hz
Wechselstrom in Europa	50 Hz
UKW-Radiowellen	87,5 – 108 MHz

Beschreibung von Schwingungen mithilfe eines *t*-*s*-Diagramms

Trägt man die Auslenkung $s(t)$ einer mechanischen Schwingung gegenüber der Zeit t auf, so erhält man ein t-s-Diagramm. Man erkennt, dass es sich um das t-s-Diagramm einer Schwingung handelt, wenn eine periodische Bewegung um eine Gleichgewichtslage ($s = 0$) dargestellt ist.

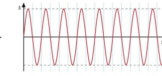


B4 Ein Beispiel eines t-s-Diagramms einer mechanischen Schwingung.

Aus einem solchen t-s-Diagramm (vgl. B4) lassen sich alle charakteristischen Größen einer mechanischen Schwingung herauslesen bzw. berechnen:
Zu jedem Zeitpunkt t_1 lässt sich die Auslenkung $s(t_1)$ des Körpers aus der Ruhelage direkt ablesen. Die Amplitude s_{max} erhält man durch Ablesen des betragsmäßig größten s-Werts. Die Schwingungsdauer T ergibt sich, indem man die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichen Auslenkungen oder zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichen Nullstellen abliest. „Gleich" bedeutet in diesem Fall den gleichen Zustand, d. h. gleicher s-Wert, gleiche Geschwindigkeit und gleiche Richtung.
Die Frequenz f der Schwingung lässt sich mithilfe der Formel $f = \frac{1}{T}$ berechnen.

Ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen

Lässt man ein Fadenpendel schwingen, so wird die Amplitude mit der Zeit immer kleiner (vgl. B5) und das Pendel kommt schließlich in der Gleichgewichtslage zur Ruhe. Der Grund dafür sind Reibungsvorgänge, die sich in der Realität nicht verhindern lassen. Man spricht von einer gedämpften Schwingung. Möchte man eine ungedämpfte Schwingung erhalten, bei der die Amplitude immer gleichbleibt, so muss dem Körper in regelmäßigen Abständen Energie zugeführt werden (vgl. B6).



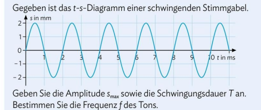
B5 \ Abnehmende Amplitude einer gedämpften Schwingung und konstante Amplitude einer ungedämpften Schwingung.



B6 \ Konstante Amplitude bei einem Metronom: Durch die aufgezogene Feder wird dem Pendel dauernd mechanische Energie zugeführt.

Musteraufgabe

Gegeben ist das *t*-*s*-Diagramm einer schwingenden Stimmgabel.



Geben Sie die Amplitude s_{max} sowie die Schwingungsdauer T an. Bestimmen Sie die Frequenz f des Tons.

Lösung

Die Amplitude lässt sich direkt ablesen: $s_{max} = 2{,}0$ mm

5,0 Schwingung dauern 10 ms.

Damit lässt sich T berechnen:

$T = \frac{t}{n} = \frac{10\text{ ms}}{5{,}0} = 2{,}0\text{ ms}$

Die Frequenz erhält man durch:

$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}0020\text{ s}} = 500\,\frac{1}{\text{s}} = 500\text{ Hz}$

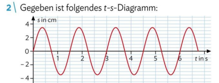
Arbeitsaufträge

1 \ Suchen Sie mindestens vier Beispiele für periodische Bewegungen.

a) Geben Sie jeweils begründet an, ob es sich um mechanische Schwingungen handelt.

b) Beschreiben Sie die mechanischen Schwingungen und erläutern Sie jeweils die Begriffe Amplitude, Periodendauer, Auslenkung, Frequenz, rücktreibende Kraft und Gleichgewichtslage.

2 \ Gegeben ist folgendes *t*-*s*-Diagramm:



Bestimmen Sie die Amplitude s_{max}, die Schwingungsdauer T sowie die Frequenz f der Schwingung.

3 \ Das nachfolgende Bild zeigt das *t*-*s*-Diagramm einer Schwingung, bei der die Gleichgewichtslage nicht in der Mitte der Umkehrpunkte liegt.

Es gilt: $s_{max} = 3$ cm, $f = 20$ Hz.

Übertragen Sie das Diagramm in Ihr Heft und beschriften Sie die Achsen.

4 \ Das nebenstehende Bild zeigt die (angenommen reibungsfreie) Schwingung einer Kugel in einer Mulde zwischen den Punkten A und B. Zeigen Sie, dass gilt: $F_r = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$

Berechnen Sie $a = \frac{F_r}{m}$ und daraus T und f für $s_{max} = 50$ cm und $\alpha = 45°$. Skizzieren Sie das zugehörige *t*-*s*-Diagramm.

Hilfestellung auf Seite 210-212

Kennzeichen einer harmonischen Schwingung

Der Verlauf einer Schwingung kann sehr kompliziert sein. Das zeigen die Beispiele in M1 und M2 (S. 52f). Andererseits gibt es, beispielsweise bei einer Stimmgabel, auch sehr einfache *t*-*s*-Diagramme. In der Physik ist man immer bestrebt, möglichst einfache Modellsysteme zu finden und zunächst diese vollständig zu verstehen. Erst danach wird versucht, mit diesem Wissen tatsächlich auftretende Situationen zu beschreiben. Das Modellsystem wird dazu in der Regel ergänzt und verfeinert werden müssen.

Die Schwingung der Stimmgabel oder auch des Federpendels stellt ein solches Modellsystem dar. Es zeichnet sich dadurch aus, dass sich im *t*-*s*-Diagramm ein sinusförmiger Verlauf ergibt. Eine solche Schwingung heißt *harmonische Schwingung*.

B1 Sinusfunktion mit unterschiedlichen Parametern *a*.

Wenn die Schwingung nicht mit $s(0) = 0$ beginnt, dann kann das mit einem zusätzlichen Winkel φ_0 beschrieben werden: $s(t) = s_{max} \cdot \sin(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0)$

Aus der Mathematik ist die allgemeine Sinusfunktion (vgl. B1) bekannt; sie lautet $f(x) = a \cdot \sin(b \cdot x + c)$. Mit unseren Abkürzungen für die Amplitude s_{max} und die Schwingungsdauer T wird daraus:

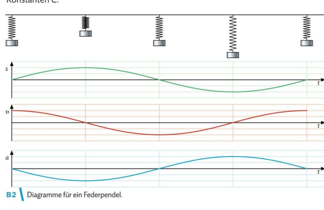
$s(t) = s_{max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$

Dabei ist es wichtig, zwischen der Zeit t als unabhängiger Variablen (die Zeit, die vergeht) und der Schwingungsdauer T als festem Wert für die betrachtete Schwingung zu unterscheiden.

Außerdem ist zu beachten: In der Formel wird mit dem Bogenmaß gerechnet; eine Schwingung wiederholt sich also nach 2π (entspricht 360°). Achten Sie also darauf, dass Sie bei ihrem Taschenrechner die passende Einstellung vornehmen.

Das Argument der Sinusfunktion, $\frac{2\pi}{T} \cdot t$, wird Phasenwinkel genannt. Für den Term $\omega = \frac{2\pi}{T}$ verwendet man, wie schon in Kapitel 1, die Bezeichnung „Winkelgeschwindigkeit“ oder auch „Kreisfrequenz“.

In der Lernaufgabe M2 (S. 53) haben Sie zusätzlich zum *t*-*s*-Diagramm auch ein *t*-*υ*-Diagramm einer harmonischen Schwingung erstellt. Ebenso lässt sich auch die Beschleunigung als Funktion der Zeit auftragen, wie in B2 dargestellt. Es fällt auf, dass der Graph von $a(t)$ die gleiche Form besitzt wie der zu $s(t)$, er ist lediglich an der *t*-Achse gespiegelt. Mathematisch bedeutet das: $a(t) = -C \cdot s(t)$ mit einer positiven Konstanten C.



B2 Diagramme für ein Federpendel.

Die Bedeutung der Konstanten C lässt sich gut am Federpendel erkennen. Im Hookeschen Bereich ist die Kraft direkt proportional zur Ausdehnung. Weil beide aber in unterschiedliche Richtungen zeigen, lässt sich mit der Proportionalitätskonstanten D schreiben: $F(t) = -D \cdot s(t)$. Deshalb ergibt sich:
$a(t) = \frac{F(t)}{m} = -\frac{D}{m} \cdot s(t)$. Dieser Zusammenhang gilt allgemein und ist charakteristisch für eine harmonische Schwingung.

Die Konstante D nennt man auch Federkonstante oder Federhärte.

Bei einer harmonischen Schwingung ist der Graph im t-s-Diagramm eine Sinuskurve. Sie tritt immer dann auf, wenn die rücktreibende Kraft direkt proportional und entgegengerichtet zur Auslenkung ist.

Spezielle Situation: Das Fadenpendel

Um eine Schwingung als harmonische Schwingung einordnen zu können, genügt es also, die Kraft zu betrachten, die bei einer Auslenkung zurück in Richtung der Gleichgewichtslage wirkt. Beim Fadenpendel ist die Situation so wie in B3 dargestellt.

Betrachtet man als Auslenkung die waagrechte Position des Pendelkörpers, so hängt sie mit dem Auslenkungswinkel α zusammen durch $\sin(\alpha) = \frac{s}{l}$. Die Gewichtskraft F_G kann mit einem Kräfteparallelogramm aufgeteilt werden in eine Komponente, die durch die Spannung des Fadens ausgeglichen wird, und eine rücktreibende Komponente. Für diese gilt:

$\sin(\alpha) = -\frac{F_r}{F_G}$. Zusammen hat man also:

$\frac{F_r}{F_G} = -\sin(\alpha) = -\frac{s}{l}$

bzw.

$F_r = -F_G \cdot \frac{s}{l} = -\frac{mg}{l} \cdot s$

Auch hier sind also rücktreibende Kraft und Auslenkung einander entgegengesetzt gerichtet und zueinander direkt proportional.

B3 \ Kräfte beim Fadenpendel.

Wenn das Koordinatensystem für s nach rechts zeigt, dann sind die Werte für s und α in B3 negativ. Weil aber F_r nach rechts zeigt, also positiv ist, muss in die Gleichung ein Minuszeichen eingefügt werden.

Streng genommen ist diese Argumentation nur dann zulässig, wenn s und F_r die gleiche Richtung haben. Eine harmonische Schwingung ergibt sich deshalb nur näherungsweise bei kleinen Auslenkungen.

Arbeitsaufträge

1 \ Nennen Sie Beispiele für mechanische Schwingungen im Alltag. Begründen Sie jeweils, ob es sich dabei um eine harmonische Schwingung handelt.

2 \ Betrachten Sie nochmals Aufgabe 2 auf S. 57 und geben Sie die Gleichung der dort im Diagramm gezeigten Schwingung an.

3 \ Begründen Sie den Verlauf des t-a-Diagramms in B2. Argumentieren Sie dabei mit Steigungsdreiecken im t-v-Diagramm.

↳ weitere passende Aufgaben:
S. 90, Nr. 1

4 \ Die Bewegung einer Wassermenge in einem gekrümmten U-Rohr (vgl. B2 auf S. 54) ist ebenfalls eine harmonische Schwingung.

a) Beschreiben Sie die Gleichgewichtslage der Wassersäule und geben Sie eine sinnvolle Größe s an, anhand derer die Auslenkung messbar ist.

b) Die rücktreibende Kraft F_r ist in diesem Fall die Gewichtskraft der „überstehenden" Wassersäule. Begründen Sie damit, dass $F_r \sim s$ ist. Verwenden Sie dabei die Formel für die Dichte des Wassers $\varrho = \frac{m}{V}$.

V1 Hypothesen zur Schwingungsdauer

Sie haben im vorhergehenden Abschnitt das Fadenpendel als Modellsystem für eine harmonische Schwingung kennengelernt. Der Vorteil eines solchen einfachen Systems besteht auch darin, dass nur wenige Größen einen Einfluss auf das Verhalten haben können. Die daraus folgenden Vermutungen lassen sich als Hypothesen formulieren. Die Methode zur Hypothesenbildung ist bereits aus den letzten Jahren bekannt und kann auf S. 222 nachgelesen werden.

Arbeitsauftrag

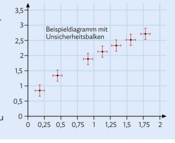
a) Überlegen und notieren Sie verschiedene physikalische Größen, von denen die Schwingungsdauer eines Fadenpendels abhängen könnte.
b) Formulieren Sie zu jeder der möglichen Einflussgrößen einen genauen Satz als Hypothese und geben Sie den vermuteten Zusammenhang mit der Schwingungsdauer in mathematischer Form oder zumindest als Je-desto-Beziehung (vgl. Methode S. 221) an.
c) Sammeln Sie in der Klasse die so formulierten Hypothesen und bilden Sie Gruppen für die arbeitsteilige Überprüfung.

V2 Planung und Durchführung des Experiments

Zur Überprüfung der von Ihnen aufgestellten Hypothesen müssen die vermuteten Einflussgrößen systematisch variiert werden. Um die Ergebnisse zu protokollieren hilft Ihnen die schon in den letzten Jahren eingeübte Struktur (ZABMA, vgl. Methode auf S. 220).

Arbeitsauftrag

a) Planen Sie ein Experiment, mit dem Sie die vermutete Abhängigkeit der Schwingungsdauer von einer der Einflussgrößen in V1 untersuchen können. Stellen Sie dabei sicher, dass sich weitere Größen nicht ebenfalls ändern.
b) Benennen Sie mögliche Ursachen für Messunsicherheiten. Schätzen Sie die Genauigkeit Ihres Messergebnisses bei Einmalmessung ab (vgl. Methode auf der nächsten Seite).
c) Wiederholen Sie die Messungen mehrfach und bestimmen Sie sowohl die empirische Standardabweichung als auch die Messunsicherheit des Mittelwerts (vgl. Methode auf der nächsten Seite). Statt mehrfach nacheinander zu messen, können Sie auch die gleichzeitigen Ablesewerte mehrerer Beobachter verwenden.
d) Erstellen Sie ein Diagramm Ihrer Messergebnisse und stellen Sie darin die Messunsicherheiten geeignet dar. Entscheiden Sie dann, ob innerhalb dieser Messunsicherheiten ein Einfluss auf die Schwingungsdauer festgestellt werden kann.
Hinweis: In Tabellenkalkulationsprogrammen lässt sich die Standardabweichung einer Messreihe direkt berechnen, z. B. mit dem Befehl STABWA(B1:F1) für Daten in den Zellen B1 bis F1. Ein solcher „Fehlerindikator" lässt sich dann auch als „Diagrammelement" zu Diagrammpunkten hinzufügen.



Methode

Messabweichungen und Messunsicherheiten

Jeder in einem Experiment gemessene Wert ist ungenau und weicht vom theoretisch zu erwartenden „richtigen“ Wert ab. Dafür gibt es zwei Gründe:

1. Das Messgerät selbst ist fehlerhaft oder es wird falsch verwendet. Daran ändert sich auch nichts, wenn die Messung wiederholt wird. Man spricht hier von einer *systematischen Abweichung*; sie geht in der Regel immer in die gleiche Richtung.

   Beispiel: Das Lineal wird falsch angelegt, deshalb sind alle Messwerte zu klein.

2. Selbst bei perfekten Messgeräten und richtiger Handhabung wird es bei mehrfachen Messungen immer zu *zufälligen Abweichungen* kommen. Sie beruhen auf äußeren Einflussfaktoren (z. B. ein Windstoß) und sind letztlich nicht zu vermeiden. Wenn alle n Einzelmessungen mit der gleichen Sorgfalt geschehen, ist es sinnvoll, den Mittelwert μ als Endergebnis der Messung anzugeben.

$$\mu = \frac{1}{n}(x_1 + \ldots + x_n)$$

Die Physik ist eine exakte Wissenschaft. Deshalb versucht man immer, die Messabweichung zahlenmäßig anzugeben. Dies ist allerdings nur für die zufälligen Abweichungen möglich. Als grobe Abschätzung wird die Messunsicherheit aus dem kleinsten und größten gerade noch vertretbaren Wert berechnet.

Beispiel: Die Position des Kugelmittelpunkts im Foto liegt sicher zwischen 774 mm und 776 mm, also ist der Messwert 775 mm und die Messunsicherheit 1 mm.

Mathematisch genauer verwendet man als Maß für die Messunsicherheit meist die (empirische) Standardabweichung σ.

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{(x_1 - \mu)^2 + \ldots + (x_n - \mu)^2}$$

Dadurch, dass die jeweiligen Unterschiede zwischen Messwert und Mittelwert quadriert werden, werden Abweichungen in beide Richtungen gleich behandelt.

Beispiel: Für den Kugelmittelpunkt oben werden nacheinander 774 mm, 776 mm und 776 mm gemessen. Für den Mittelwert ergibt sich dann

$\mu = (774\,\text{mm} + 776\,\text{mm} + 776\,\text{mm}) : 3 = 775{,}3\,\text{mm}$.

Die Standardabweichung ist:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{3-1}} \cdot \sqrt{(-1{,}3)^2 + (0{,}7)^2 + (0{,}7)^2}\ \text{mm} = 1{,}2\ \text{mm}.$$

Rein intuitiv sollte eine Messung genauer werden, wenn sie oft wiederholt wird. Allerdings wird sich die Standardabweichung dadurch nicht verringern. Sie gibt nämlich den Bereich an, in dem einzelne Messwerte zu erwarten sind. Der Bereich, in dem sich der Mittelwert aufhält, wird durch die wiederholte Messung hingegen immer enger. Eine mathematische Modellierung ergibt, dass sich der tatsächliche Mittelwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3 % im Bereich $\mu \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ aufhält. Die Größe $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ kann somit als Messunsicherheit des Mittelwerts nach n Messungen betrachtet werden. Um diese Messunsicherheit zu halbieren, müssen also viermal so viele Messungen durchgeführt werden.

Im Beispiel oben ist nach drei Messungen

$$\frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{1{,}2\,\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0{,}67\,\text{mm}.$$

V3 Formulierung einer Gesetzmäßigkeit

Bei den Experimenten in V2 werden Sie feststellen, dass die Schwingungsdauer im Wesentlichen nur von einer einzigen Größe abhängt. Allerdings ergibt sich aus dem Diagramm keine lineare Funktion.

Arbeitsauftrag

a) Geben Sie einen Funktionstyp an, der den Zusammenhang der Größen im Diagramm besser beschreibt, und formulieren Sie ihn mathematisch.

b) Wie beim waagrechten Wurf kann auch hier eine der beiden Größen im Diagramm so verändert werden, dass sich in einem neuen Diagramm ein linearer Zusammenhang ergibt. Erstellen Sie ein solches Diagramm; tragen Sie dabei eine der Größen quadratisch auf.

c) Entnehmen Sie der physikalischen Formelsammlung die Beziehung für die Periodendauer des Fadenpendels. Vergleichen Sie diese Beziehung mit Ihren eigenen Ergebnissen.

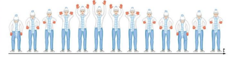


5 Mechanische Wellen

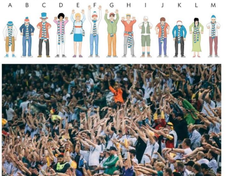
Versuche und Materialien zu Kapitel 5.1

M1 Lernaufgabe: La Ola - Die Welle

In einem Stadion reißt eine Person auf den Zuschauerrängen immer wieder die Arme nach oben, während alle anderen Zuschauer nichts tun. Diese periodische Bewegung an einem Ort kann man als Schwingung beschreiben.



Wenn allerdings mehrere hundert dicht zusammenstehende Zuschauer begeistert ihre Bewegungen koordinieren, entsteht ein beeindruckendes Phänomen: La Ola – die Welle.



Die Begeisterung der einzelnen Personen (im physikalischen Modell: die Energie der Welle) breitet sich dabei im Stadion aus, ohne dass die Beteiligten (im Modell: die schwingende Materie) sich fortbewegen: Sie werden durch La Ola in ihrer „Ruhelage" gestört, und diese Störung – auch Anregung genannt – breitet sich über die Zuschauerränge hinweg aus. Zugunsten einer einfacheren Beschreibung gehen Physiker oft davon aus, dass immer wieder eine Anregung erfolgt, sich also alle Beteiligten unablässig bewegen und die Welle sich ständig fortsetzt.

Arbeitsauftrag

a) Erläutern Sie, inwiefern die Einzelbewegung eines Zuschauers als physikalische Schwingung beschrieben werden kann, und geben Sie die entsprechenden Kenngrößen an. Benennen Sie Eigenschaften, in denen die Bewegung hier von einer physikalischen Schwingung abweicht.

b) Beschreiben Sie den Übergang von der Einzelbewegung zur kompletten La Ola-Welle. Beschreiben Sie den Eindruck, den ein feststehender Beobachter gewinnt, der die La Ola-Welle im Stadion beobachtet.

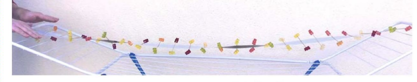
c) Geben Sie die Größen der Schwingung an, die für die Beschreibung der Welle übernommen werden können.

d) Recherchieren und erklären Sie die neuen zusätzlichen Größen Wellenlänge λ und Ausbreitungsgeschwindigkeit c.

e) Die Zuschauer A und M bewegen sich identisch, man sagt auch: Sie bewegen sich in Phase. Begründen Sie, dass die Zeitdauer, die die Welle benötigt, um sich vom Zuschauer A bis zum Zuschauer M auszubreiten, mit der „Schwingungsdauer" des Zuschauers A zusammenhängt.

f) Drücken Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Welle über die Wellenlänge λ und die in e) betrachtete Zeitdauer aus.

▶M2 Einstieg: Gummibärchen-Wellenmaschine



Oben sehen Sie eine selbstgebaute Wellenmaschine: Durch Antippen des ersten Gummibärchenpaares lassen sich auch die anderen Paare zum Schwingen bringen, denn über das Gewebeklebeband sind benachbarte Spieße miteinander gekoppelt. Sie beeinflussen sich also in ihren Bewegungen und eine Welle entsteht.
Eine Wellenmaschine aus der Physiksammlung hat prinzipiell den gleichen Aufbau. Die Kopplung erfolgt hier allerdings mit zwei gespannten Schraubenfedern. Außerdem kann durch einen Mechanismus der Zustand der Wellenmaschine „eingefroren“ werden.



Arbeitsauftrag

a) Bauen Sie die Gummibärchen-Wellenmaschine nach (Hilfe finden Sie im Mediencode). V

MC 67051-06

b) Tippen Sie das erste Paar auf verschiedene Weisen kurz an und beobachten Sie die Ausbreitung der Störung. Treffen Sie eine Aussage über die Ausbreitungsgeschwindigkeit. V

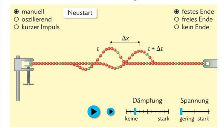
c) *„Bei einer Welle erfolgt Energietransport, aber kein Materietransport.“* Erläutern Sie diese Aussage anhand der Gummibärchen-Wellenmaschine.

▶M3 Einstieg: virtuelle Wellenmaschine

Über den Mediencode gelangen Sie zu einer Simulation, mit der sich „Seilwellen“ untersuchen lassen.

MC 67051-07

Beginnen Sie für Aufgabe b) mit den Einstellungen „manuell“, „festes Ende“ und schwacher Dämpfung und geringer Spannung.
Setzen Sie dann die Einstellungen auf „oszillieren“, „kein Ende“ und „keine Dämpfung“. Lineale, Stoppuhr und Messlinie sind nützliche Werkzeuge.



Arbeitsauftrag

a) Machen Sie sich mit der Simulation vertraut und testen Sie die verschiedenen Einstellungen aus.

b) Beschreiben Sie die Bewegung der gesamten Perlenkette und die Bewegung einer einzelnen Perle. V

c) Finden Sie durch Probieren die Bedeutung der Begriffe „Amplitude“, „Frequenz“ und „Dämpfung“ heraus. V

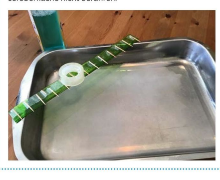
d) Bestimmen Sie im Computerexperiment die Geschwindigkeit, mit der sich die Welle nach rechts bewegt. Beschreiben Sie Ihr Vorgehen. V

e) Erläutern Sie, dass sich die wiederholte Anregung ohne Dämpfung sehr einfach durch ein mathematisches Modell beschreiben lässt.

M4 Einstieg: Wasser kämmen

Mit einem „Wasserkamm“ können Eigenschaften von Wellen untersucht werden. Dabei werden kleine Nägel oder halbierte Zahnstocher mit Klebeband so an einem Lineal befestigt, dass die Zinken des „Kamms“ in regelmäßigen Abständen etwa 5 mm über die Linealkante ragen (vgl. Foto). Nun wird ein flaches Gefäß (Backblech o. ä.) mit wenigen Millimetern Wasser befüllt und ein Spritzer Spülmittel hinzugegeben, um die Oberflächenspannung zu reduzieren. Wird der Wasserkamm ins Wasser gestellt, sollte die Linealkante die Wasseroberfläche nicht berühren.

Benötigte Materialien:
- kleine Nägel oder halbierte Zahnstocher
- Klebeband
- 1 Lineal
- 1 flaches Gefäß
- Milch und Spülmittel



Arbeitsauftrag

a) Bauen Sie das Experiment wie beschrieben auf.
b) Tupfen Sie zunächst nur mit einem Zahnstocher / Nagel in das Wasser und beschreiben Sie die entstehenden Wellen.
c) Wiederholen Sie den Versuch aus b) nun mit dem Wasserkamm. Beschreiben Sie auch hier ihre Beobachtungen.
d) Geben Sie jetzt auf einer Seite ein wenig Milch in das Wasser und ziehen Sie den Wasserkamm von der Milchseite her durch das Wasser (vgl. Foto). Halten Sie Ihre Beobachtungen fest.



e) Erhöhen Sie nun die Zahl der Zinken und wiederholen Sie Ihre Versuche. Dokumentieren Sie Ihre Ergebnisse.

Versuche und Materialien zu Kapitel 5.3

M5 Lernaufgabe: Ultraschallwellen

Die Überlagerung von zwei Wellen lässt sich gut am Beispiel von Ultraschallwellen demonstrieren. Das sind Schallwellen, deren Frequenzen deutlich über der liegen, die für Menschen hörbar ist. Ein für Schulexperimente typischer Wert liegt bei 40 kHz. Schallwellen mit solchen Frequenzen werden durch Piezokristalle erzeugt. Diese Kristalle besitzen die besondere Eigenschaft, dass durch Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Abmessungen verändert werden können. Eine Wechselspannung entsprechender Frequenz bringt den Kristall also zum Schwingen, und diese Schwingungen können – wie bei einer Lautsprechermembran – an die Luft weitergegeben werden.

Arbeitsauftrag

a) Schließen Sie zunächst nur einen Sender an und bestimmen Sie die Amplitude der Ultraschallwelle am Oszilloskop. Schließen Sie nun nur den zweiten Sender an und wiederholen Sie diese Messung.

Umgekehrt können Kräfte, die auf den Kristall wirken, in elektrische Spannungen umgesetzt werden. Ein Piezo-Sender lässt sich deshalb auch als Empfänger einsetzen. Im Versuchsaufbau stehen zwei Sender hintereinander; ihr gegenseitiger Abstand ist einstellbar (Foto rechts). Gegenüber steht ein Empfänger, der an ein Oszilloskop angeschlossen ist (Foto links). Mit ihm lassen sich die Ultraschallwellen sichtbar machen. Die Amplitude zeigt die „Lautstärke" der empfangenen Ultraschallwelle an.

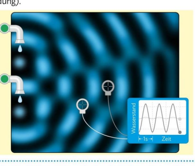




b) Messen Sie jetzt die Amplitude am Empfänger beim gleichzeitigen Betrieb von beiden Sendern.
c) Verändern Sie den gegenseitigen Abstand der beiden Sender und bestimmen Sie wieder die Amplitude am Empfänger. Führen Sie diesen Versuch mehrfach durch und stellen Sie eine Hypothese für das Zustandekommen der maximalen Amplitude auf.
d) Bestimmen Sie die Frequenz der Ultraschallwellen und berechnen Sie damit ihre Wellenlänge. Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt etwa $343 \frac{m}{s}$. Stellen Sie einen Bezug zwischen Ihrem Ergebnis und der Hypothese in c) her.

▶ M6 Lernaufgabe: Wellenwanne als Simulation

In zwei Dimensionen können Überlagerungen von Wellen gut in einer flachen Wasserschale („Wellenwanne") gezeigt werden (vgl. auch M4). Der Mediencode MC 67051-08 hier führt zu einer Simulation, mit der man die Wellen in einer Wasserschale untersuchen kann. Dabei wird ein bequemes Abmessen verschiedener Größen gestattet. Für diesen Zweck stellt die Simulation ein Maßband und eine Stoppuhr zur Verfügung. Ein *t*-*y*-Diagramm an zwei beliebigen Stellen kann mit einem Sensor aufgenommen werden, der die Auf- und Abbewegung der Wasseroberfläche misst (vgl. Abbildung).



Arbeitsauftrag

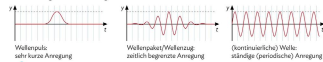
a) Öffnen Sie zunächst nur einen der beiden Wassertropfer. Beschreiben Sie die Bedeutung der hellen und der dunklen Flächen. Bestimmen Sie dann für die entstehende Kreiswelle die Frequenz, die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit.
b) Öffnen Sie nun auch den zweiten Wassertropfer und beschreiben Sie das entstehende Wellenbild auf der Wasseroberfläche.
c) Finden Sie mit den beiden *t*-*y*-Sensoren je eine Stelle mit minimaler und mit maximaler Amplitude.
d) Bestimmen Sie für die beiden in c) gefundenen Stellen die Abstände zum ersten und zum zweiten Wassertropfer und vergleichen Sie sie mit der Wellenlänge von a).
e) Stellen Sie je eine Hypothese für das Zustandekommen der maximalen und der minimalen Amplitude auf. Testen Sie ihre Hypothese an weiteren Stellen der Wellenwanne.

Anregung und Entstehung

Im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen (vgl. Kap. 6) benötigen mechanische Wellen ein Medium, das die Wellen überträgt. Dieses Medium, auch Träger genannt, muss schwingungsfähige Elemente (Teilchen) enthalten, die untereinander verbunden (gekoppelt) sind. Beispiele hierfür können Sie in M1-M3 untersuchen:

schwingungsfähiges Element	Kopplung über ...
Zuschauer im Stadion	Blickkontakt
Gummibärchenpaar	Gewebeklebeband
Perle	Seil

Wird ein Element durch eine Störung oder Anregung aus seiner Ruhelage ausgelenkt, indem man ihm Energie zuführt, so überträgt es diese Energie infolge der Kopplung mit einer Zeitverzögerung auf benachbarte Teilchen. Je nach Dauer der Anregung können sich die folgenden Fälle ergeben:



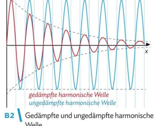
B1 Unterschiedliche Auslenkungen, je nach Dauer der Anregung.

Wellenpulse eignen sich gut, um verschiedene Effekte vereinfachend zu betrachten. Meist bietet sich aber für physikalische Beobachtungen das Verhalten einer (kontinuierlichen) Welle mit ihrer andauernden Abfolge von Bergen und Tälern an.

Harmonische Welle und Dämpfung

Führen die einzelnen Elemente des Mediums eine harmonische Schwingung (also eine Sinusschwingung) aus, so besitzt auch eine Momentaufnahme der entstehenden Welle eine Sinusform. Solche Sinuswellen heißen harmonische Wellen, ganz analog zum Begriff der harmonischen Schwingung (vgl. Kap. 4.2).

In der Realität geht allerdings bei der Energieübertragung immer ein Teil der Energie z. B. durch Reibungsvorgänge in innere Energie über. Deshalb nimmt die maximale Auslenkung der Teilchen mit zunehmendem Abstand zum Erreger ab (vgl. B2): Eine reale Welle ist immer gedämpft. Im Folgenden werden wir uns jedoch meistens auf ungedämpfte harmonische Wellen beschränken, weil sie sich einfacher beschreiben lassen und in vielen Fällen eine gute Näherung darstellen.



B2 Gedämpfte und ungedämpfte harmonische Welle.

Im Gegensatz zu einer Schwingung, bei der nur ortsfeste Energieumwandlungen stattfinden, breitet sich also bei einer Welle die Energie über den Raum hinweg aus; obwohl es genau wie bei der Schwingung keine Ausbreitung der Teilchen gibt.

Eine mechanische Welle ist die Ausbreitung einer periodischen Auslenkung von miteinander gekoppelten schwingungsfähigen Elementen. Diese Auslenkung findet in einem Medium statt. Eine Welle überträgt Energie in Ausbreitungsrichtung. Es findet kein Materietransport statt; Materie schwingt nur ortsgebunden.

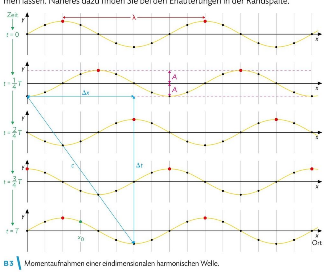
Eindimensionale harmonische Welle

Um eine Welle zu analysieren, betrachtet man oft eine Reihe von Momentaufnahmen in gleichen Zeitabständen. Jede einzelne Momentaufnahme zu einem festen Zeitpunkt t_0 ergibt dann ein x-y-Diagramm, das jeweils die Auslenkungen der schwingenden Elemente in y-Richtung an den verschiedenen x-Positionen veranschaulicht. In B3 werden fünf solcher Momentaufnahmen der gleichen Welle dargestellt, die jeweils einen zeitlichen Abstand von $t = \frac{1}{4}T$ zueinander haben. Dabei wird auch hervorgehoben, wie sich anhand einer solchen Darstellung die verschiedenen Kenngrößen einer Welle bestimmen lassen. Näheres dazu finden Sie bei den Erläuterungen in der Randspalte.

Der Mediencode zeigt die Animation einer eindimensionalen Welle:



MC 67051-09



B3 Momentaufnahmen einer eindimensionalen harmonischen Welle.

Kenngrößen einer Welle:

Schwingungsdauer T
Zeit, die ein Element für eine vollständige Schwingung benötigt.

Wellenlänge λ
Abstand zweier Elemente im gleichen Schwingungszustand • (gleicher Ort, gleiche Geschwindigkeit)

Amplitude A
Maximale Auslenkung der schwingenden Elemente • •

Frequenz f
Anzahl der Schwingungen eines Elementes pro Zeiteinheit; es gilt: $f = \frac{1}{T}$
Einheit: 1 Hz = 1/s

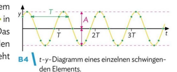
In B3 lässt sich sehen, dass sich das Wellental nach einer Zeit Δt um die Stecke Δx nach rechts bewegt hat. Nach einer kompletten Schwingung eines Elements, d. h. nach der Zeit T, hat sich die Stelle des Wellentals genau um die Wellenlänge λ nach rechts bewegt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Welle im Medium ist also:

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} \Leftrightarrow \lambda = c \cdot T$$

Der konkrete Wert von c wird bestimmt von der Stärke der Kopplung sowie von der Masse und dem Abstand der miteinander verbundenen Teilchen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beschreibt das Fortschreiten eines bestimmten Zustands, z. B. eines Wellentals. Sie ist zu unterscheiden von der Geschwindigkeit, mit der die einzelnen Elemente schwingen.

Beachten Sie: Mit c ist bei mechanischen Wellen nicht die Lichtgeschwindigkeit gemeint!

Für einen festen Ort x_0 kann man außerdem die Bewegung eines einzelnen Elements • in Abhängigkeit von der Zeit darstellen. Das entspricht einem t-y-Diagramm. Für den markierten Ort x_0 im Diagramm B3 sieht das dann wie in B4 dargestellt aus.

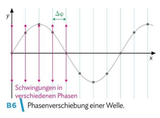


B4 t-y-Diagramm eines einzelnen schwingenden Elements.

Das eindimensionale Kugel-Feder-Modell

B5 Das eindimensionale Kugel-Feder-Modell.

Jede eindimensionale harmonische Welle lässt sich mit dem sogenannten Kugel-Feder-Modell abstrahieren. Dabei werden die schwingungsfähigen Elemente durch Kugeln dargestellt, die Kopplung geschieht durch elastische Schraubenfedern. Die Auslenkung einer Kugel aus ihrer Ruhelage bewirkt über die Federkopplung eine zeitversetzte Auslenkung der benachbarten Kugel. Nachbarkugeln schwingen also immer versetzt zueinander, man spricht von einer Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen den Bewegungen der einzelnen Elemente. Erst wenn die Phasenverschiebung 2π beträgt, schwingen die entsprechenden Kugeln wieder im Takt (gleichphasig).



B6 Phasenverschiebung einer Welle.

Die Phase wird im Bogenmaß angegeben.

gegenphasig: um π phasenverschoben

Allgemein bezeichnet die Phase φ (auch Phasenwinkel genannt) den Schwingungszustand eines Elementes, also den aktuellen Ort mit der aktuellen Bewegungsrichtung.

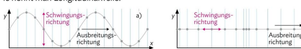
Longitudinal- und Transversalwellen

Bisher haben wir Wellen betrachtet, bei denen die einzelnen Elemente senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen: Bewegt sich die Welle von links nach rechts, schwingen die Elemente von oben nach unten. Man spricht von Transversalwellen. Die Elemente können aber auch in Ausbreitungsrichtung schwingen (vgl. B7). Eine solche Welle nennt man Longitudinalwelle.

Über den Mediencode gelangen Sie zu Animationen einer Transversal- bzw. Longitudinalwelle.



MC 67051-10



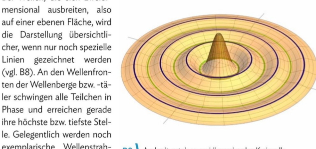
B7 Unterscheidung zwischen a) Transversal- und b) Longitudinalwelle.

Bei einer Transversalwelle schwingen die einzelnen Elemente senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.
Bei einer Longitudinalwelle schwingen sie in der Ausbreitungsrichtung.

Zweidimensionale Wellen

Beispiel für eine zweidimensionale Wasserwelle:

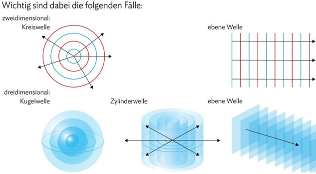
Bei Wellen, die sich zweidimensional ausbreiten, also auf einer ebenen Fläche, wird die Darstellung übersichtlicher, wenn nur noch spezielle Linien gezeichnet werden (vgl. B8). An den Wellenfronten der Wellenberge bzw. -täler schwingen alle Teilchen in Phase und erreichen gerade ihre höchste bzw. tiefste Stelle. Gelegentlich werden noch exemplarische Wellenstrah-


B8 Ausbreitung einer zweidimensionalen Kreiswelle.

len eingezeichnet. Das sind Linien, die senkrecht auf den Wellenfronten stehen und die Ausbreitungsrichtung der Welle angeben.

Wellenformen in mehreren Dimensionen

Man benennt Wellenformen nach der Art und Weise, wie sie sich im Raum ausbreiten. Wichtig sind dabei die folgenden Fälle:



Arbeitsaufträge

**1 ** Überprüfen Sie die folgenden Aussagen begründet auf ihren Wahrheitsgehalt hin:

a) Bei einer Vergrößerung der Frequenz einer Welle verringert sich die Wellenlänge bei gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit.

b) Verdoppelt man die Wellenlänge bei fester Frequenz, dann halbiert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

c) Bei einer Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle ändert sich auch die Frequenz dieser Welle.

**2 ** Berechnen Sie jeweils die fehlende Größe:

a) $c = 2{,}3\,\frac{m}{s}$; $T = 1{,}2$ s; $\lambda = ?$

b) $c = 3{,}3 \cdot 10^2\,\frac{m}{s}$; $f = 0{,}88$ kHz; $\lambda = ?$

c) $\lambda = 4{,}2$ cm; $c = 1{,}8\,\frac{km}{h}$; $T = ?$

d) $\lambda = 4{,}0$ m; $c = 3{,}3 \cdot 10^2\,\frac{m}{s}$; $f = ?$

**3 ** a) Das Diagramm zeigt eine Momentaufnahme einer Welle. Bestimmen Sie die Wellenlänge.

0 10 20 x in cm

b) Das Diagramm rechts zeigt drei Momentaufnahmen einer Welle im Abstand von 0,2 s. Bestimmen Sie die Wellenlänge und die Frequenz der Welle.

0 20 40 60 80 100 x in cm

0 20 40 60 80 100 x in cm

0 20 40 60 80 100 x in cm

**4 ** Begründen Sie jeweils, ob durch die folgenden Aktionen eine Longitudinalwelle oder eine Transversalwelle erzeugt wird:

a) Ein Seil wird an einem Ende auf und ab bewegt.

b) Eine lange Schraubenfeder wird in Längsrichtung angeregt.

c) Jemand schlägt auf eine Trommel.

d) Eine Gitarrensaite wird angezupft.

e) Ein Lautsprecher erzeugt einen Ton.

f) Ein Tropfen Milch fällt in eine Kaffeetasse.

**5 ** Zwei identische harmonische Wellen legen unterschiedliche Entfernungen zu einem Wellensensor zurück. Bestimmen Sie den Wegunterschied Δs zwischen den beiden Wellen so, dass die Wellen am Sensor ...

- gleichphasig schwingen.
- gegenphasig schwingen.

Drücken Sie Ihr Ergebnis dabei jeweils in Vielfachen der Wellenlänge λ aus.

↳ weitere passende Aufgaben:
S. 90, Nr. 3, 4, 6, 7, 8; S. 91, Nr. 10, 13; S. 92, Nr. 15; S. 93, Nr. 16

5.2 Eigenschaften von mechanischen Wellen, Beugung

Ausbreitung von Wellen

Wellen breiten sich vom Erreger aus geradlinig aus, d. h. entlang der Wellenstrahlen und senkrecht zu den Wellenfronten. Dieses Verhalten ändert sich, wenn sie auf Hindernisse treffen: Dann beobachtet man vier charakteristische Phänomene, die bei allen Wellenarten auftreten.

Licht kann ebenfalls als Welle beschrieben werden, vgl. Kapitel 6.

In diesem Unterkapitel soll zunächst die Beugung betrachtet werden, die sich beim Ablenken von Wellen an einem Hindernis beobachten lässt. Das Phänomen der Interferenz wird in Kapitel 5.3 näher betrachtet. Die Reflexion und Brechung werden nur kurz angesprochen, aber nicht weiter vertieft.

Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz lassen sich mithilfe von zwei einfachen grundlegenden Prinzipien verstehen: dem Superpositionsprinzip und dem Huygensschen Prinzip.

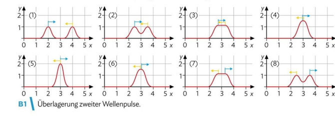
Superpositionsprinzip: Überlagerung von Wellen

Mit einer Wellenmaschine (z. B. der Gummibärchen-Wellenmaschine aus M2, S. 63) lässt sich an jedem Ende gleichzeitig je ein kurzer Wellenpuls erzeugen. Das Verhalten, das sich dabei beobachten lässt, zeigt die Abbildung B1.

Der Mediencode zeigt ein Video zur Superposition.



MC 67051-11



B1 Überlagerung zweiter Wellenpulse.

Die beiden Wellenpulse durchdringen sich gegenseitig, ohne einander zu beeinflussen. Nach dem Aufeinandertreffen laufen die beiden Wellenpulse so auseinander, als hätte es die Begegnung nie gegeben.

Diese ungestörte Überlagerung von Einzelgrößen nennt man in der Physik allgemein Superposition. Sie tritt in ganz verschiedenen Teilgebieten auf und verknüpft sie somit konzeptionell. Solche übergreifenden Ideen nennt man in der Physik oft „Basiskonzepte“. Ähnlich wie die Gegenstandsbereiche (Anhang, S. 213) helfen sie, die Physik zu strukturieren.

Der Mediencode zeigt verschiedene animierte Beispiele zur Superposition.



MC 67051-12

Die Superposition der Wellen erhält man, indem man die Auslenkungen der Einzelwellen in jedem Punkt addiert. Befinden sich zwei Wellenberge am gleichen Ort, so addieren sich ihre Amplituden zu einem höheren Wellenberg.

Trifft dagegen ein Wellenberg an einem Ort auf ein Wellental gleicher Amplitude, so löschen sich die beiden am Treffpunkt aus. In B1 wäre das der Fall, wenn einer der beiden Wellenpulse eine negative Auslenkung besitzt. Zur Bestimmung der Amplitude, die bei der Superposition der Wellen an einem bestimmten Ort entsteht, werden also die beiden einzelnen Amplituden an diesem Ort, inklusive Vorzeichen, addiert. Im Mediencode finden Sie verschiedene Animationen dazu, die auch diesen Fall darstellen.

Das Huygenssche Prinzip

Im Material M4 ist beschrieben, wie Sie sich eine eigene Wellenwanne bauen können. Vielleicht waren es genau solche Experimente, die den niederländischen Physiker Chris-

tiaan Huygens 1678 auf die Idee brachten, ein einfaches, später nach ihm benanntes Modell zu entwickeln, das die Ausbreitung von Wellen intuitiv und anschaulich beschreibt. Jeder Punkt einer Wellenfront wird dabei als Quelle einer sogenannten Elementarwelle betrachtet (vgl. B2). Das ist eine kreis- bzw. kugelförmige Welle, die sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Wellenfront ausbreitet. Elementarwellen besitzen immer die gleiche Frequenz und Wellenlänge wie die erzeugende Welle. Die Überlagerung der Wellenfronten der Elementarwellen ergibt die nächste Wellenfront in Ausbreitungsrichtung (grüne Linie in B2).

Aussprache: ˈhœi̯ɣəns

— Wellenstrahl
— Elementarwelle
— neue Wellenfront
• Quelle einer Elementarwelle

B2 Huygenssches Prinzip: Die blau eingezeichneten Elementarwellen bilden in ihrer Gesamtheit eine neue Wellenfront.

Der französische Physiker Augustin Jean Fresnel zeigte 1816 mathematisch, dass sich die rücklaufenden Elementarwellenanteile gegenseitig auslöschen.

Jeder Punkt einer Wellenfront ist Quelle einer Elementarwelle.

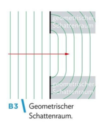
Die Elementarwellen und die erzeugende Welle stimmen in Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit überein.

Die weiterlaufende Welle kann als Superposition einer unendlichen Zahl von Elementarwellen angesehen werden.

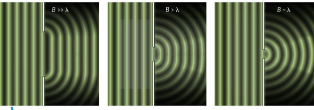
Mithilfe des Huygensschen Prinzips lassen sich zahlreiche Wellenphänomene beschreiben, wie Sie auf den folgenden Seiten sehen werden. Es handelt sich natürlich nur um ein Modell, dessen Vorhersagen aber in zahlreichen Experimenten bestätigt werden konnten, was ihm eine große Wichtigkeit für die Physik verleiht.

Beugung von Wellen

Treffen ebene Wellen auf ein Hindernis mit einer Öffnung, so registriert man hinter der Spaltöffnung auch Wellenfronten im sogenannten geometrischen Schattenraum (vgl. B3). Dieses Phänomen ist umso ausgeprägter, je näher die Spaltbreite B an die Größenordnung der Wellenlänge λ rückt. Diese Eigenschaft weisen alle Arten von Wellen nach Durchgang durch eine Öffnung auf; man spricht allgemein von einer Beugung.



B3 Geometrischer Schattenraum.



B4 Beugung in Abhängigkeit von verschiedenen Spaltbreiten.

Der Mediencode zeigt eine Animation zur Beugung von Wellen.



MC 67051-13

Verständlich wird dieses Verhalten mit dem Huygensschen Prinzip. Jeder der unendlich vielen Punkte zwischen den Wänden der Öffnung wird zum Ausgangspunkt einer Elementarwelle. Diese Elementarwellen überlagern sich rechts von der Öffnung. Im Falle

Bei allen diesen Überlegungen sind die Begriffe „breit“ oder „eng“ immer in Bezug zur Wellenlänge zu betrachten. Das Auftreten von Beugungsphänomenen gibt also einen ersten Anhaltspunkt für die Größenordnung der Wellenlänge.

des breiten Spalts entsteht so wieder eine nahezu ebene Welle; die Randbereiche sind viel schwächer ausgeprägt. Ist der Spalt jedoch sehr eng, so ist das Überlagerungsmuster in allen Richtungen gleich. Es lassen sich jetzt auch weit außerhalb des geometrischen Schattenraums ähnlich große Amplituden registrieren wie in der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung der Welle. Im theoretischen Grenzfall einer punktförmigen Öffnung erhält man hinter dem Spalt nur eine halbkreisförmige Elementarwelle (vgl. B4).

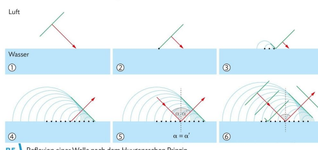
Der Mediencode zeigt eine Animation zur Reflexion.



MC 67051-14

Exkurs: Reflexion nach dem Huygensschen Prinzip

Die Reflexion einer Welle an einer Grenzfläche lässt sich mit dem Huygensschen Prinzip schrittweise wie in B4 dargestellt erklären. In ① bewegt sich die Wellenfront einer ebenen Welle in einem Medium, z. B. Luft, auf ein anderes Medium zu, z. B. Wasser. In ② trifft die Wellenfront unter einem Winkel auf die Grenzfläche. Die anschließende Ausbreitung nach der Reflexion ist in ③ dargestellt. In allen Berührpunkten der Wellenfront mit der Grenzfläche werden nach dem Huygensschen Prinzip Elementarwellen erzeugt, einige Quellen dieser Elementarwellen sind durch rote Punkte symbolisiert. Die Ausbreitung setzt sich in ④ - ⑥ fort: Die entstehenden Elementarwellen bewegen sich mit der Geschwindigkeit der ursprünglichen Welle im ersten Medium (Luft). Die Superposition aller Elementarwellen ergibt die reflektierte Welle.



B5 Reflexion einer Welle nach dem Huygensschen Prinzip.

Exkurs: Brechung nach dem Huygensschen Prinzip



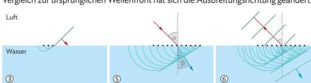
Der Mediencode zeigt eine Animation zur Brechung.



MC 67051-15

Auch die Brechung erfolgt an der Grenzfläche zwischen zwei Medien, die Punkte ① bis ③ aus B5 treffen also ebenfalls zu. Der einzige Unterschied besteht darin, dass man die Elementarwellen betrachtet, die durch die einlaufende Wellenfront im zweiten Medium erzeugt werden (vgl. B6). Diese breiten sich mit einer anderen Geschwindigkeit aus, denn die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle hängt immer vom Medium ab. Die Superposition der Elementarwellen im zweiten Medium ergibt eine neue Wellenfront. Im Vergleich zur ursprünglichen Wellenfront hat sich die Ausbreitungsrichtung geändert.

Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit im zweiten Medium kleiner als im ersten, so wird die Welle zum Einfallslot hin gebrochen, sonst vom Lot weg.

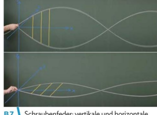


B6 Brechung einer Welle nach dem Huygensschen Prinzip.

Exkurs: Polarisation von Wellen

Bei Transversalwellen, die sich im Raum ausbreiten, schwingen die einzelnen Elemente senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Das bedeutet allerdings nicht automatisch, dass bei zwei solcher Wellen die Schwingungsrichtungen übereinstimmen müssen.

Ein einfaches Freihandexperiment (vgl. B7) macht das deutlich: Eine lange Schraubenfeder kann mit der Hand sowohl auf und ab bewegt werden als auch in einer waagrechten Ebene hin und her. In der Physik spricht man hier von der linearen Polarisation einer Transversalwelle: Im ersten Fall liegt eine vertikale Polarisation vor, im zweiten Fall eine horizontale.

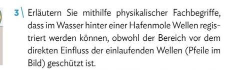


B7 \ Schraubenfeder: vertikale und horizontale Polarisation.

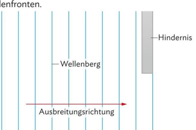
Die Ebene, die durch die Schwingungsrichtung und die Ausbreitungsrichtung definiert ist, heißt Schwingungsebene. In dem Freihandexperiment oben lässt sich die Schwingungsebene auch ändern. Man beginnt z. B. zunächst mit einer vertikalen Schwingung und geht langsam zu einer horizontalen über. Geschieht dies gleichmäßig, so spricht man von einer zirkularen Polarisation. Bei den meisten Phänomenen zu mechanischen Wellen spielt die Polarisation nur eine untergeordnete Rolle. Wichtiger wird sie bei elektromagnetischen Wellen, die in der 12. Klasse betrachtet werden.

Arbeitsaufträge

1 \ Stellen Sie sich zu zweit an einer Gebäudeecke auf (vgl. nebenstehende Skizze). Erklären Sie die Tatsache, dass Sie sich problemlos unterhalten können, obwohl kein direkter Sichtkontakt besteht.



2 \ Eine ebene Welle trifft wie abgebildet auf ein Hindernis. Konstruieren Sie die nächsten beiden Wellenfronten.



3 \ Erläutern Sie mithilfe physikalischer Fachbegriffe, dass im Wasser hinter einer Hafenmole Wellen registriert werden können, obwohl der Bereich vor dem direkten Einfluss der einlaufenden Wellen (Pfeile im Bild) geschützt ist.



4 \ Superposition findet in der Physik nicht nur bei Wellen statt. Stellen Sie weitere Fälle zusammen, in denen sich der Wert einer physikalischen Größe einfach durch Überlagerung von Einzelwerten ermitteln lässt. Erläutern Sie jeweils auch, wie eventuelle Richtungen der Einzelgrößen die Richtung der Gesamtgröße beeinflussen.

Aus dem Lateinischen:
inter: zwischen; *ferire*: schlagen

Interferenz

Der Begriff Interferenz bezieht sich auf alle Situationen, bei denen sich zwei oder mehr Wellen an einer Stelle des Raumes überlagern. Von der Einführung des Superpositionsprinzips in Kap. 5.2 kennen wir bereits ein spezielles eindimensionales Beispiel: zwei Wellenpulse, die aufeinander zulaufen. Dabei ließ sich beobachten, dass sich zwei positive Wellenpulse („Wellenberge") zu einem doppelt so hohen positiven Wellenpuls überlagern können. Analog können sich zwei negative Wellenpulse („Wellentäler") zu einem doppelt so tiefen Wellenpuls überlagern. Treffen hingegen ein Wellenberg und ein Wellental aufeinander, so entsteht ein Wellenpuls der Höhe null – die beiden Wellenpulse scheinen völlig verschwunden zu sein.
Zusammenfassend können also folgende Extremfälle auftreten:

Mehrere Wellen können sich an einem Ort maximal verstärken (positiv oder negativ). Man spricht von *konstruktiver Interferenz*.

Mehrere Wellen können sich an einem Ort komplett auslöschen. Man spricht von *destruktiver Interferenz*.

Zur Erinnerung:
harmonisch = sinusförmig

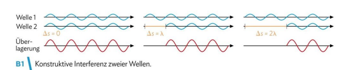
Wegen $\lambda = c \cdot T$ gilt mit
$f = \frac{1}{T} \Leftrightarrow T = \frac{1}{f}$ auch
$\lambda = \frac{c}{f} \Leftrightarrow c = \lambda \cdot f$
Also ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit c dann ebenfalls gleich.

Im Folgenden beschränken wir uns auf zwei harmonische Wellen, die miteinander interferieren und ihren Ursprung in zwei beliebigen Raumpunkten haben können (z. B. zwei Lautsprecher oder zwei Spalte, von denen Elementarwellen ausgehen). Diese Situation bezeichnet man als Zwei-Quellen-Interferenz.

Gangunterschied und Art der Interferenz

Beim Versuch mit Ultraschallwellen (M5 auf S. 64/65) wird die Überlagerung längs einer Linie, also eindimensional, betrachtet. Dabei zeigt sich: Entscheidend für die Verstärkung oder Auslöschung an einem bestimmten Ort ist die Wegstrecke, die die beiden Wellen von ihrer jeweiligen Quelle bis zu diesem Ort zurückgelegt haben.
Damit stets ein Wellenberg auf einen Wellenberg oder ein Wellental auf ein Wellental trifft, müssen die beiden Wellen überall gleichphasig schwingen. Das ist dann der Fall, wenn sich die zurückgelegten Wegstrecken um eine, zwei, drei, ... Wellenlängen unterscheiden. Der Wegunterschied Δs (auch Gangunterschied genannt) muss also ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein. Die Überlagerung der beiden Wellen ist dann wieder eine Sinuswelle, jedoch mit doppelter Amplitude. Im Experiment in M5 ist der Empfang dann maximal.

gleichphasig bedeutet:
kein Phasenunterschied bzw. Phasenunterschied
$\Delta\varphi = 2k \cdot \pi$
mit $k \in \mathbb{N}$

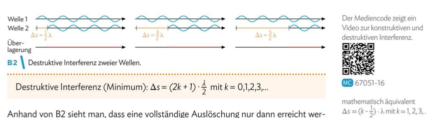


B1 Konstruktive Interferenz zweier Wellen.

Konstruktive Interferenz (Maximum): $\Delta s = k \cdot \lambda$ mit $k = 0,1,2,3,...$

Damit stets ein Wellenberg auf ein Wellental trifft, müssen die beiden Wellen überall gegenphasig schwingen. Das ist dann der Fall, wenn sich die zurückgelegten Wegstrecken um eine halbe, drei halbe, fünf halbe, ... Wellenlängen unterscheiden. Die beiden Wellen überlagern sich dann zu null. Im Experiment M5 empfängt man dann kein Signal.

gegenphasig bedeutet:
kein Phasenunterschied
$\Delta\varphi = (2k + 1) \cdot \pi$
mit $k \in \mathbb{N}$



B2 \ Destruktive Interferenz zweier Wellen.

Der Mediencode zeigt ein Video zur konstruktiven und destruktiven Interferenz.

MC 67051-16

Destruktive Interferenz (Minimum): $\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ mit $k = 0,1,2,3,...$

mathematisch äquivalent $\Delta s = (k - \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ mit $k = 1, 2, 3, ...$

Anhand von B2 sieht man, dass eine vollständige Auslöschung nur dann erreicht werden kann, wenn die beiden überlagerten Wellen gleiche Wellenlänge und Amplitude besitzen. Bei Transversalwellen müssen außerdem die Schwingungsrichtungen übereinstimmen.

Interferenz bei Kreiswellen

Das Konzept des Gangunterschieds lässt sich ohne Weiteres auch auf zweidimensionale Situationen übertragen. In B3 sind zwei Quellen gezeichnet, die Kreiswellen gleicher Wellenlänge aussenden. Wie in Kapitel 5.1 sind nur die Wellenfronten der Wellenberge (rot) und der Wellentäler (blau) markiert. Im Punkt P trifft also ein Wellenberg der oberen Welle auf einen Wellenberg der unteren Welle und es liegt eine konstruktive Interferenz vor. Das bleibt auch so, wenn sich die beiden Wellen weiter ausbreiten und dann in P Wellental auf Wellental trifft. Entscheidend ist – wie im eindimensionalen Fall – der Gangunterschied $\Delta s = |s_1 - s_2|$. Er ist an der betrachteten Stelle $\Delta s = |3\lambda - 2\lambda| = \lambda$. Die Merkkästen dieses Kapitels behalten also auch hier ihre Gültigkeit.

B3 \ Interferenz zweier Kreiswellen.

Arbeitsaufträge

1 \ Der QR-Code führt zu der Darstellung der beiden Kreiswellen von B3. Drucken Sie diese aus oder arbeiten sie mit ihr am Tablet.

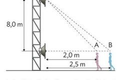
MC 67051-17

a) Markieren Sie alle Punkte, an denen Wellenberg auf Wellenberg oder Wellental auf Wellental trifft, und verbinden Sie sie sinnvoll. Beschreiben Sie das Signal, das ein Empfänger an diesen Stellen registriert.

b) Markieren Sie alle Punkte, an denen Wellenberg auf Wellental trifft, und verbinden Sie diese sinnvoll. Beschreiben Sie das Signal, das ein Empfänger an diesen Stellen registriert.

weitere passende Aufgaben:
S. 90, Nr. 9; S. 91, Nr. 12; S. 93, Nr. 17

2 \ Für ein Konzert werden zwei Lautsprecher 8,0 m voneinander entfernt aufgebaut. Beim Soundcheck wird ein Ton mit der Frequenz 440 Hz abgespielt. Die Schallgeschwindigkeit beträgt 343 $\frac{m}{s}$.



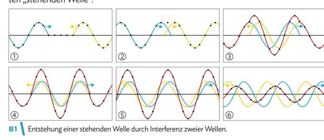
a) Begründen Sie mithilfe einer Rechnung die Beobachtung, die ein Zuhörer an den Orten A und B macht.

b) Erläutern Sie die Wahrnehmung eines Zuhörers, der sich auf der Geraden AB von der Lautsprecheranordnung wegbewegt.

Entstehung einer stehenden Welle durch zwei Wellen

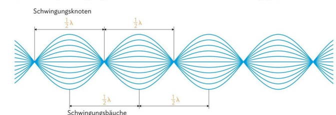
Betrachtet man die Verbindungslinie der beiden Quellen in B3 auf S. 75, so findet man eine regelmäßige Abfolge von Maxima und Minima. B1 zeigt das Zustandekommen in einer Dimension: Zwei harmonische Wellen mit entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung, aber mit gleicher Wellenlänge und Amplitude, überlagern sich zu einer sogenannten „stehenden Welle".

• Schwingende Elemente
Welle 1
Welle 2
Überlagerung



B1 Entstehung einer stehenden Welle durch Interferenz zweier Wellen.

Bestimmte Elemente im Abstand einer halben Wellenlänge bewegen sich dabei überhaupt nicht. Zwischen zwei solchen „Schwingungsknoten" treten im Wechsel Wellenberge und Wellentäler mit der doppelten Amplitude einer der Ursprungswellen auf. Sie werden als „Schwingungsbäuche" der stehenden Welle bezeichnet, vgl. B2.



B2 Charakteristische Elemente einer stehenden Welle.

Eine stehende Welle entsteht durch Interferenz zweier gegenläufiger Wellen. Dabei treten jeweils im Abstand von $\frac{\lambda}{2}$ Schwingungsknoten auf; dazwischen liegen – ebenfalls im Abstand von $\frac{\lambda}{2}$ – Schwingungsbäuche.

Mit der Simulation im Mediencode können Sie die Reflexion am festen und am losen Ende genauer untersuchen.

MC 67051-18

Der Mediencode zeigt eine zusätzliche Abbildung zur Reflexion am festen Ende.

MC 67051-19

Entstehung einer stehenden Welle durch Reflexion

Der gegenläufige Wellenzug kann auch durch Reflexion zustande kommen. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten: Reflexion am festen Ende und Reflexion am losen Ende.

Kann sich das Element einer Welle, das sich in der Reflexionsebene befindet, nicht bewegen (z. B. ein Seil oder eine Saite, die fest eingespannt sind), so spricht man von einem festen Ende. In diesem Fall wird aus einem Wellenberg der nach rechts laufenden Welle ein Wellental der nach links laufenden Welle und umgekehrt. Ihre Überlagerung ergibt null, deshalb besitzt hier die stehende Welle einen Knoten an der Reflexionsebene (vgl. B3).



B3 Reflexion am festen Ende.

Ist umgekehrt das letzte Element an der Reflexionsebene einer Welle in Schwingungsrichtung frei beweglich (z. B. ein Seil, das mit einem beweglichen Ring an einem Stab befestigt ist), so spricht man von einem losen Ende. In diesem Fall bleibt ein Wellenberg ein Wellenberg und ein Wellental ein Wellental. Durch Überlagerung der nach rechts und links laufenden Welle erfolgt hier eine Verstärkung, deshalb besitzt die stehende Welle einen Bauch an der Reflexionsebene (vgl. B4).



B4 \ Reflexion am losen Ende.

Der Mediencode zeigt eine zusätzliche Abbildung zur Reflexion am losen Ende.

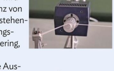




MC 67051-20

Musteraufgabe

Ein gespanntes Gummiseil ($l = 2{,}25$ m) wird durch einen Exzenter mit einer Frequenz von 50 Hz angeregt; dabei erhält man eine stehende Welle mit insgesamt fünf Schwingungsbäuchen (der Hub am Exzenter ist so gering, dass dort nahezu ein Knoten vorliegt). Berechnen Sie die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle.





Lösung

Es ist $l = 5 \cdot \frac{\lambda}{2}$

$\Rightarrow \lambda = \frac{2}{5} \cdot l = 0{,}90$ m

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich dann zu

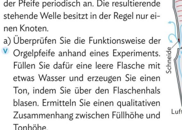
$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = 0{,}90\ \text{m} \cdot 50\ \text{s}^{-1}$

$= 45\ \text{ms}^{-1}$.

Bemerkung: Diese Geschwindigkeit ist im Experiment abhängig von der Seilspannung.

Arbeitsaufträge

1 \ Viele Orgelpfeifen, wie man sie häufig in Kirchen oder Klostern findet, erzeugen den Ton, indem ein Luftstrom auf eine Schneide geleitet wird. Die dort entstehenden Luftwirbel regen die Luftsäule im Inneren der Pfeife periodisch an. Die resultierende stehende Welle besitzt in der Regel nur einen Knoten.



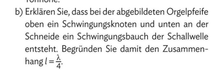
a) Überprüfen Sie die Funktionsweise der **V** Orgelpfeife anhand eines Experiments. Füllen Sie dafür eine leere Flasche mit etwas Wasser und erzeugen Sie einen Ton, indem Sie über den Flaschenhals blasen. Ermitteln Sie einen qualitativen Zusammenhang zwischen Füllhöhe und Tonhöhe.

b) Erklären Sie, dass bei der abgebildeten Orgelpfeife oben ein Schwingungsknoten und unten an der Schneide ein Schwingungsbauch der Schallwelle entsteht. Begründen Sie damit den Zusammenhang $l = \frac{\lambda}{4}$.

c) Das menschliche Ohr kann Töne mit Frequenzen zwischen 20 Hz und 20 kHz wahrnehmen. Berechnen Sie jeweils die Länge der kleinsten und größten sinnvollen Orgelpfeife wie in der Abbildung („gedackte Orgelpfeife"). Die Schallgeschwindigkeit beträgt 343 ms^{-1}.

d) Durch einen stärkeren Luftstrom, das „Überblasen", kann man die Knotenanzahl in der Orgelpfeife erhöhen, siehe Tabelle. Geben Sie den physikalischen Grund dafür an und erstellen Sie jeweils eine Skizze. Bestimmen Sie die Frequenz des dritten Obertons einer gedackten Orgelpfeife der Länge 2,4 m.

1 Knoten	Grundton
2 Knoten	1. Oberton
3 Knoten	2. Oberton
...	...



weitere passende Aufgaben: S. 91, Nr. 11

6 Licht als elektromagnetische Welle

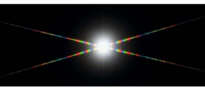
Versuche und Materialien zu Kapitel 6.1

M1 Lernaufgabe: Licht – typische Phänomene und verschiedene Modelle zur Erklärung





Typische Phänomene im Bereich der Optik sind Schattenbildung, gerichtete Reflexion, Brechung und Streuung. In der siebten und achten Klasse haben Sie einfache Erklärungen dafür mit dem Strahlenmodell für Licht entwickelt. Reflexionen gibt es nicht nur an Spiegeln, auch die glatte Oberfläche z. B. eines (nicht entspiegelten) Fernsehbildschirms ist dafür geeignet. Allerdings stellt man dabei fest, dass neben der gespiegelten Lichtquelle weitere Erscheinungen auftreten, die sich mit dem Lichtstrahlenmodell nicht erklären lassen.





Sie wissen bereits, dass sich weißes Licht aus allen Farben zusammensetzt. Deshalb ist die weitere Untersuchung einfacher, wenn eine Lichtquelle verwendet wird, die nur aus einem sehr engen Bereich des Spektrums besteht. Eine solche Lichtquelle ist ein Laser.



Auch bei Schatten können unerwartete Phänomene auftreten. Auf dem Bild hier wurde ein Metall-Lineal so gehalten, dass es die Sonne komplett verdeckt. Dennoch leuchten die Kanten auf Sonnenhöhe hell auf.

Arbeitsauftrag

a) Stellen Sie eine Übersicht über das Vorwissen zusammen, das Sie bis jetzt zu dem Thema „Licht" haben. Gehen Sie dabei insbesondere auf das Lichtstrahlenmodell ein.

b) V Beleuchten Sie den (nicht entspiegelten) schwarzen Bildschirm eines ausgeschalteten Fernsehers oder eines Tablets mit einer lichtstarken weißen Lichtquelle. Die Taschenlampe des Handys eignet sich gut dafür. Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.

c) V Verwenden Sie einen Laserpointer und beobachten Sie damit einen Laserstrahl, der am Bildschirm eines Handys reflektiert und auf einer weißen Wand aufgefangen wird. Dokumentieren Sie Ihre Beobachtung geeignet.

! Blicken Sie niemals in den direkten oder den reflektierten Strahl! Sichern Sie den Versuchsbereich so ab, dass auch keine andere Person gefährdet werden kann!

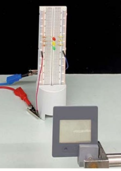
d) V Planen Sie ein Experiment ähnlich wie in der Abbildung mit dem Lineal. Bedenken Sie dabei aber unbedingt die Gefahren, die durch sehr helle Lichtquellen für den Beobachter entstehen. Suchen Sie deshalb nach geeigneten Alternativen. Führen Sie das Experiment durch und dokumentieren Sie Ihre Beobachtung fotografisch.

e) Geben Sie zu den Teilen b) bis d) an, ob die Beobachtungen jeweils durch das Lichtstrahlenmodell erklärt werden können.

Versuche und Materialien zu Kapitel 6.2

M2 Einstieg: Optisches Gitter

Ein optisches Gitter ist ein Glasplättchen oder eine Kunststofffolie mit sehr feinen parallelen Streifen, die abwechselnd durchsichtig und lichtundurchlässig sind. Typischerweise besitzen solche Strukturen zwischen 500 und 1000 Spalte pro Millimeter, durch die Licht hindurchtreten kann. Zur genaueren Untersuchung können verschiedenfarbige LEDs verwendet werden, die z. B. wie in der Abbildung auf einem Steckbrett aufgebaut werden. Hier sind die LEDs parallel geschaltet; in jedem Zweig liegt außerdem noch ein Widerstand, der die Stromstärke durch die LED begrenzt.





- Steckbrett
- Elektrizitätsquelle
- verschiedenfarbige LEDs
- Vorwiderstände
- optisches Gitter
- Kabel und Klemmen

Arbeitsauftrag

a) Bauen Sie die gezeigte oder eine ähnliche Schaltung auf. Beachten Sie dabei, dass LEDs nur in einer Anschlussrichtung leitend sind und leuchten. Die Vorwiderstände sollten einige 100 Ω betragen.

b) Fotografieren Sie die LEDs durch ein optisches Gitter hindurch, das Sie direkt vor die Kamera halten. Wenn möglich, verwenden Sie ein Weitwinkelobjektiv.

c) Beschreiben Sie Ihre Beobachtung und gehen Sie dabei auch auf die unterschiedlichen Farben ein. Beurteilen Sie, ob diese Beobachtung mit Ihrer bisherigen Vorstellung von Licht vereinbar ist.

M3 Einstieg: Bunte Schokolade



Ein optisches Gitter (siehe M2) lässt sich auch verwenden, um der Oberfläche von Lebensmitteln eine kammartige Struktur aufzuprägen. Schokolade ist dafür besonders geeignet. Sie kann leicht geschmolzen werden und passt sich so auch an feine Oberflächendetails einer Deckschicht an. Je nach Einfallsrichtung und Farbe des Lichts ergeben sich dann schillernde Farbeffekte. Das gleiche Phänomen lässt sich an CDs und DVDs beobachten. Im Tierreich besitzen manche Schmetterlinge sehr feine Strukturen auf ihren Flügelschuppen und erscheinen dann in sehr schillernden, meist bläulichen Farben.

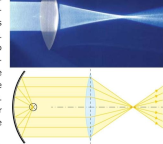
Arbeitsauftrag

a) Recherchieren Sie im Internet nach den Stichworten „iridescent chocolate". Neben vielen Abbildungen finden Sie dort auch Anleitungen, um diesen Effekt selbst herzustellen. Probieren Sie es aus und dokumentieren Sie Ihre Beobachtungen.

b) Die Flügelfarben der Schmetterlingsart *„Morpho cypris"* entstehen durch den beschriebenen Effekt. Suchen Sie nach Informationen über die Größenordnung der dafür verantwortlichen Strukturen und stellen Sie eine Hypothese zu entsprechenden Längen im Zusammenhang mit Licht auf.

Grenzen der geometrischen Optik

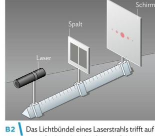
Viele optische Phänomene lassen sich mit dem Strahlenmodell erklären, bei dem man davon ausgeht, dass sich das Licht geradlinig ausbreitet. Die Modellvorstellung des Lichts ist dabei die von Lichtstrahlen, d. h. von unendlich engen Lichtbündeln. So kann man beispielsweise die Schattenbildung hinter einem Hindernis oder die Lichtbündelung durch Sammellinsen wie in B1 gut mit dem Strahlenmodell erklären. Optische Geräte wie ein Mikroskop oder ein Fernrohr lassen sich auf der Grundlage dieses Modells bauen.
Allerdings kann man auch Beobachtungen machen, die mit dem Strahlenmodell nur unzureichend oder gar nicht erklärt werden können. Beispiele dafür zeigen die folgenden Abschnitte.



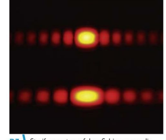
B1 Bündelung des Lichts durch eine Sammellinse im Strahlenmodell.

Beugung und Streuung von Licht

Schattenbilder wurden bereits im Physikunterricht der 7. Klasse thematisiert. Mit dem Strahlenmodell lässt sich der Schattenbereich geometrisch konstruieren. Allerdings ist bei genauer Betrachtung die Grenze zwischen „hell" und „dunkel" nicht so exakt bestimmt, wie zunächst angenommen.
Besonders eindrucksvoll sieht man das, wenn man einen schmalen Spalt mit Laserlicht beleuchtet und dann das Licht beobachtet, das auf einem Schirm hinter dem Spalt auftrifft (vgl. B2). Ausgehend von der Strahlenoptik erwartet man auf dem Schirm einen hellen Bereich in der Mitte und links und rechts davon die Schattenbereiche. Tatsächlich aber erscheint ein Streifenmuster wie im oberen Teil von B3. Schritt für Schritt wird nun die Spaltbreite reduziert. Die Vorhersage aus der Strahlenoptik wäre, dass sich auch auf dem Schirm die Breite des „Musters" reduziert. Aber in der Realität beobachtet man weiterhin ein Streifenmuster, sogar mit immer breiteren Streifen, obwohl die Spaltbreite abnimmt. Wir kennen dieses Phänomen bereits von mechanischen Wellen, dort haben wir es als Beugung bezeichnet (vgl. Kap 5.3).



B2 Das Lichtbündel eines Laserstrahls trifft auf einen Spalt und wird auf einem Schirm aufgefangen.



B3 Streifenmuster auf dem Schirm, wenn die Spaltbreite von oben nach unten abnimmt.

Auch das Phänomen der Streuung haben wir bereits in der 7. Klasse betrachtet. In B4 ist ein Modellversuch abgebildet, der das Himmelsblau bzw. Abendrot simulieren soll. Hierzu wird eine Wanne mit Wasser gefüllt und von links mit weißem Licht beleuchtet. Nach dem Hinzufügen von etwas Milch kann von vorne ein bläuliches Licht gesehen werden, rechts vom Trog auf dem Bildschirm hingegen ein gelb-rötliches Licht. Der Grund dafür ist die Streuung des Lichts an den Milchpartikeln.



B4 \ Modellversuch zum Himmelsblau und Abendrot.

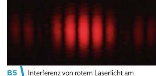
Aber warum hängt die Richtung, in die das Licht gestreut wird, von der Lichtfarbe ab? Auch diese Beobachtung kann mit dem Strahlenmodell nicht erklärt werden.

Interferenz am Doppelspalt

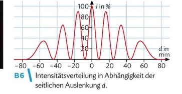
In Kap. 5.3 haben wir die Interferenz als ein typisches Wellenphänomen kennengelernt. Diese tritt jedoch nur auf, wenn die überlagerten Wellen die gleiche Wellenlänge und eine feste Phasenbeziehung aufweisen. Bei zwei verschiedenen Lichtquellen ist das in der Regel nicht der Fall. Deshalb führt man Interferenzexperimente in der Praxis oft durch, indem man einen Doppelspalt – also zwei sehr schmale Spalte in geringem Abstand zueinander – mit Laserlicht aus einer Lichtquelle beleuchtet. Es erscheint dann auf dem Bildschirm ein Interferenzmuster aus einzelnen Lichtpunkten (vgl. B5).

Wellen mit gleicher Wellenlänge und fester Phasenbeziehung nennt man kohärent.

Im Diagramm B6 sieht man die Intensitätsverteilung auf dem Beobachtungsschirm in Abhängigkeit von der seitlichen Auslenkung *d*. Man erkennt, dass das Hauptmaximum in der Mitte – also bei der Auslenkung 0 gegenüber dem einfallenden Laserlicht – am lichtstärksten ist. Links und rechts davon treten weitere Maxima auf; ihre Intensität nimmt aber zu beiden Seiten hin ab.



B5 \ Interferenz von rotem Laserlicht am Doppelspalt.



B6 \ Intensitätsverteilung in Abhängigkeit der seitlichen Auslenkung *d*.

Beim Durchgang von Licht durch einen oder mehrere enge Spalte ergeben sich Beobachtungen, die sich mithilfe des Strahlenmodells für das Licht nicht vollständig erklären lassen. Gleiches gilt für Experimente zur Lichtstreuung.

Arbeitsaufträge

1 \ Nennen Sie zwei unerwartete Beobachtungen beim Doppelspalt-Versuch und erklären Sie, dass sie im Widerspruch zum Strahlenmodell stehen.

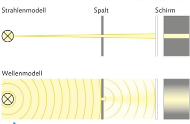
2 \ V Planen Sie zu den in diesem Kapitel vorgestellten Experimenten mit Licht die analogen Versuche mit einer Wasser-Wellenwanne und führen Sie die Versuche anschließend durch.

Für Experten:
Genauer spricht man bei Licht von einer „elektromagnetischen Welle“, bei der elektrisches und magnetisches Feld gekoppelt sind. Weitere Beispiele für elektromagnetische Wellen sind z. B. Radiowellen oder Mikrowellen.

Vergleich zwischen Wellenmodell und Strahlenmodell

Die Schwierigkeiten, Erklärungen für die Experimente im letzten Abschnitt zu finden, lassen sich überwinden, wenn das Licht als Welle betrachtet wird. Dabei ist das Huygenssche Prinzip hilfreich, das Sie bereits von den mechanischen Wellen her kennen (Kap. 5.2).

Stellt man das Strahlenmodell und das Wellenmodell für Licht gegenüber, dann ergeben sich für die Situation, dass Licht aus einer punktförmigen Lichtquelle auf einen Spalt trifft, zwei unterschiedliche Vorhersagen (vgl. B1).



B1 Licht trifft auf einen schmalen Spalt – in unterschiedlichen Modellen dargestellt.

Im Strahlenmodell wird das Licht durch den Spalt scharf begrenzt. Man zeichnet die Randstrahlen ein, die von der Lichtquelle ausgehen und gerade noch durch die Spaltbegrenzungen hindurch gehen können. Im Wellenmodell hingegen geht von der punktförmigen Lichtquelle eine Elementarwelle aus, die auf den Spalt trifft. Auch der Spalt wird wieder als Ausgangspunkt einer kreisförmigen Elementarwelle betrachtet. Diese Elementarwelle breitet sich nicht nur geradlinig nach vorne aus, sondern halbkreisförmig in den gesamten Raum. Somit gelangt auch Licht in den Bereich seitlich des Spalts.

Wellenlänge und Amplitude des Lichts

Da man die Wellenstruktur des Lichts nicht unmittelbar sehen kann, gelingt eine Wellenlängenbestimmung über den Abstand zweier Wellenberge nicht.



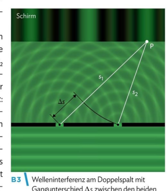
B2 Staubkörnchen im Sonnenlicht.

Eine erste Abschätzung für die Lichtwellenlänge liefert die folgende Überlegung: Um eine Welle zu stören, muss das Hindernis mindestens so groß wie die Wellenlänge sein. Das kleinste Objekt, das wir im Alltag sehen können, ist vermutlich ein Staubkörnchen. Im hellen Sonnenlicht kann man es gut sehen, es muss also größer als die Lichtwellenlänge sein. Berücksichtigt man zudem, dass die Auflösungsgrenze eines Lichtmikroskops etwa $\frac{1}{1000}$ mm, also 10^{-6} m, beträgt, dann lässt sich daraus eine obere Grenze für die Wellenlänge von Licht folgern.

Genauer kann die Wellenlänge λ mithilfe von Interferenzexperimenten bestimmt werden. Dabei zeigt sich, dass Licht unterschiedlicher Farbe verschiedene Wellenlängen besitzt. Qualitativ wird die Intensität (Helligkeit) des Lichts im Wellenmodell durch die Amplitude der Welle beschrieben.

Interferenz am Doppelspalt

Wie schon bei der Beugung am Einzelspalt (vgl. Kapitel 5.2) geht man auch hier nach dem Huygensschen Prinzip davon aus, dass die beiden Spalte jeweils als Ausgangspunkt einer Elementarwelle angesehen werden können (vgl. B3).
Wählt man auf dem Beobachtungsschirm nun einen beliebigen Punkt P, so haben die beiden Elementarwellen die Wege s_1 und s_2 zurückgelegt. Wie bereits bei den mechanischen Wellen (vgl. Kap. 5.3) gilt auch hier als Bedingung für konstruktive Interferenz: Der Wegunterschied Δs muss ein ganzzahliges Vielfaches von λ sein, allgemein also $k \cdot \lambda$ mit $k \in \mathbb{N}$. Hier entstehen die Interferenzmaxima. Ist dagegen der Wegunterschied ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$, also $(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ mit $k \in \mathbb{N}$, so kommt es zur destruktiven Interferenz, es entstehen Interferenzminima.

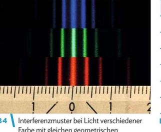


B3 Welleninterferenz am Doppelspalt mit Gangunterschied Δs zwischen den beiden Wellen.

Den Wegunterschied Δs zwischen den beiden Wellen bezeichnet man oft auch als Gangunterschied.

Beim Doppelspaltversuch mit Licht entstehen Maxima der Lichtintensität, wenn für die Wege zwischen Auftreffpunkt und den beiden Spaltmitten gilt:
$\Delta s = |s_1 - s_2| = k \cdot \lambda$ mit $k \in \mathbb{N}$
Man spricht von Interferenzmaxima k-ter Ordnung.
Interferenzminima k-ter Ordnung ergeben sich für $\Delta s = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$

Verwendet man beim Doppelspaltexperiment statt des roten Lasers einen grünen oder blauen, dann beobachtet man, dass die Interferenzmaxima enger beieinander liegen (vgl. M2 auf S. 79). Das bedeutet, dass auch der Gangunterschied kleiner ist und aus der Beziehung zwischen Δs und λ folgt, dass die Wellenlänge kleiner ist. Farbe und Wellenlänge hängen also direkt zusammen. Eine Übersicht über einige Farbtöne und die zugehörigen Wellenlängen ist in B5 dargestellt.



B4 Interferenzmuster bei Licht verschiedener Farbe mit gleichen geometrischen Bedingungen.

Farbton	Wellenlänge in nm
Violett	380-420
Blau	420-480
Grün	480-560
Gelb	560-580
Orange	580-630
Rot	630-780

B5 Wellenlängen von Licht verschiedener Farbe.

Animation zum Zusammenhang zwischen Farbe, Wellenlänge und Abstand der Interferenzmaxima.



MC 67051-21

Man spricht deshalb auch von der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit. Sie ist eine Naturkonstante.

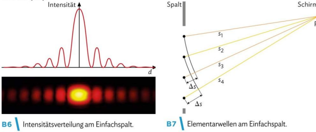
Die Lichtgeschwindigkeit *c*

Lichtwellen transportieren wie alle Wellen nur Energie, keine Materie. Allerdings zeigt sich, dass zu ihrer Ausbreitung kein Trägermedium nötig ist (vgl. auch das Michelson-Morley-Experiment in Kapitel 8.4) – anders als bei mechanischen Wellen. Lichtwellen können sich also auch durch das Vakuum ausbreiten. Dort beträgt die Lichtgeschwindigkeit $c = 2{,}99792458 \cdot 10^8\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$, also etwa $300\,000\,\frac{\text{km}}{\text{s}}$. In einem Medium, z. B. in Wasser oder in Glas, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit geringer. In Luft beträgt dieser Unterschied allerdings nur ca. 0,03 %; wir können dort also in guter Näherung mit der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit rechnen.

Licht kann als Welle betrachtet werden, die sich mit der Lichtgeschwindigkeit *c* ausbreitet. Unterschiedlichen Wellenlängen entsprechen dabei unterschiedliche Farben des Lichts; unterschiedliche Amplituden entsprechen unterschiedlicher Intensität. Im Wellenmodell des Lichts können viele Phänomene mithilfe des Huygensschen Prinzips erklärt werden. Hier geht man davon aus, dass jeder Punkt der Wellenfront als Ausgangspunkt einer kreisförmigen Elementarwelle angesehen werden kann.

Exkurs: Interferenz am Einfachspalt

Betrachtet man das Schirmbild beim Durchgang von Laserlicht durch einen Einfachspalt (vgl. S. 80) genauer, so sieht man nicht nur eine Verbreiterung des Lichtflecks in der Mitte, sondern beobachtet außerdem ein Streifenmuster aus hellen und dunklen Stellen (B6).



B6 Intensitätsverteilung am Einfachspalt. **B7** Elementarwellen am Einfachspalt.

Neben einem Hauptmaximum in der Mitte der Anordnung gibt es zu beiden Seiten Nebenmaxima mit wesentlich geringerer Intensität und Breite. Dazwischen liegen völlig dunkle Intensitätsminima. Im Wellenmodell kann diese Beobachtung folgendermaßen erklärt werden: Das Bild hinter dem Spalt entsteht dadurch, dass von unendlich vielen Punkten im Spalt Elementarwellen ausgehen, die sich auf dem Schirm überlagern. Exemplarisch sind in B7 vier solcher Wellenzentren eingezeichnet. Zwischen den Wegen s_1 und s_3 besteht ein Gangunterschied Δs, ebenso zwischen den Wegen s_2 und s_4. Bei sehr großer Entfernung zwischen Spalt und Schirm sind diese Gangunterschiede praktisch gleich groß. Im Fall $\Delta s = \frac{\lambda}{2}$ liegt eine destruktive Interferenz vor und die Wellen, die vom ersten und vom dritten Zentrum kommen, löschen sich an der Stelle *P* aus. Das gleiche passiert mit den Wellen, die vom zweiten und vom vierten Zentrum kommen. Diese Argumentation lässt sich auf beliebig viele Paare von Wellenzentren übertragen und erklärt so das Vorliegen eines Minimums bei *P*. Für weitere Minima ist $\Delta s = \frac{3}{2}\lambda$ etc.

Musteraufgabe

Trifft Licht auf einen Spalt, so ist die Ablenkung des Lichts in den Schattenbereich hinein umso größer, je kleiner die Spaltbreite ist. Erklären Sie diese Beobachtung im Wellenmodell des Lichts und mithilfe übersichtlicher Skizzen.

Lösung

Vor dem Hindernis breiten sich die Lichtwellen ungehindert aus. Man kann sie als ebene Wellenfronten, also als parallele Linien mit gleichem Abstand zeichnen. Trifft die Lichtwelle nun auf den Spalt, dann ergibt sich bei einem relativ breiten Spalt das linke Bild. In der Mitte des Spalts ergeben die Elementarwellen zusammen wieder eine parallele Wellenfront, an den Rändern sieht man die kreisförmige Ausbreitung. Ist der Spalt nun schmaler, so tritt die kreisförmige Ausbreitung der Elementarwelle deutlicher hervor.

Arbeitsaufträge

1 \ Schall und Licht können beide mit dem Wellenmodell beschrieben werden.

a) Nennen Sie möglichst viele Unterschiede zwischen Schall- und Lichtwellen.

b) *„Beugung ist ein Indiz für die Welleneigenschaft von Licht. Allerdings ist sie kein Alltagsphänomen, weil Beugung nur dann auftritt, wenn die Spaltöffnung die gleiche Größenordnung wie die Wellenlänge hat."* Testen Sie diese These zunächst, indem Sie sie auf Schall- und Wasserwellen anwenden. Begründen Sie die These dann mithilfe des Huygensschen Prinzips. Fertigen Sie hierzu aussagekräftige Zeichnungen an.

2 \ Nimmt man Bilder mit einer Lochkamera auf, dann beobachtet man, dass man bei einer Reduzierung der Blendenöffnung von 0,6 mm auf 0,35 mm ein schärferes Bild erhält. Reduziert man die Blendenöffnung dann weiter auf 0,15 mm, wird das Bild aber wieder unschärfer. Erklären Sie diese Beobachtung mithilfe des Wellenmodells für Licht.

3 \ Wenn der Abstand zweier Maxima beim Doppelspaltversuch sehr viel kleiner ist als der Abstand zwischen Doppelspalt und Schirm, dann gilt näherungsweise: $\Delta s \approx \frac{d \cdot b}{a}$. Dabei ist d der Abstand zwischen den beiden Spaltmitten, b die jeweilige Spaltbreite und a der Abstand zwischen Spalt und Schirm.
Bei einem unter diesen Bedingungen durchgeführten Versuch wird gelbes Licht der Wellenlänge 580 nm verwendet. Der Abstand a vom Doppelspalt zum Schirm beträgt 2,0 m.

a) Acht helle und acht dunkle Streifen sind insgesamt 2,0 cm breit. Berechnen Sie hieraus den Spaltabstand d.

b) Beschreiben Sie, wie sich das Bild auf dem Schirm verändert, wenn man den Spaltabstand vergrößert.

4 \ In diesem Bild wurde ein Doppelspalt zuerst mit grünem Licht beleuchtet und dann mit weißem Licht.



Vergleichen Sie die beiden Bilder und erklären Sie das Zustandekommen des rechten Bildes. Beachten Sie dabei den Farbunterschied zwischen dem Hauptmaximum und den Nebenmaxima.

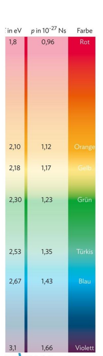
5 \ V Im Internet findet man eine Anleitung für ein einfaches Doppelspalt-Experiment (vgl. Mediencode): In ein Stück Alufolie werden mit einer Nähnadel zwei kleine Löcher dicht nebeneinander gestochen. Dann blickt man durch die beiden Löcher in Richtung einer weißen Lichtquelle.

MC 67051-22

Führen Sie das Experiment mit verschiedenen Lichtquellen und verschiedenen Lochabständen in der Folie durch, notieren Sie den Versuchsaufbau mit dem besten Ergebnis und versuchen Sie, ein Foto davon zu machen.

weitere passende Aufgaben:
S. 90, Nr. 5

6.3 Photonen- und Wellenmodell des Lichts



B2 Lichtfarben mit zugehörigen Energie- und Impulswerten.

Das Photonenmodell des Lichts

In der 9. Klasse haben Sie bereits das Photonenmodell für Licht kennengelernt. Photonen sind Lichtteilchen, die je nach Farbe des Lichts eine genau festgelegte Energieportion besitzen. Mit diesem Modell konnte man z. B. die Flammenfärbung einer Bunsenbrennerflamme (vgl. B1) durch verschiedene Salze gut erklären: Den Atomen in den Salzen wird durch die Flamme Energie zugeführt. Sie werden dadurch angeregt und in ein höheres Energieniveau versetzt. Bei der Abregung senden sie Photonen mit einer bestimmten Energie aus, wodurch die charakteristische Färbung der Flamme entsteht.



B1 Flammenfärbung durch verschiedene Salze.

Eigenschaften von Photonen

Photonen werden manchmal auch Lichtquanten genannt, weil sie eine „gequantelte", also genau festgelegte Energiemenge besitzen. Außerdem sind Photonen punktförmig und unteilbar. Sie bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit. Ihre Energie hängt direkt mit der Farbe des Lichts zusammen (vgl. B2).

Laut Albert Einstein ist wegen $E = mc^2$ mit der Energie stets auch eine Masse verbunden. Tatsächlich zeigen astronomische Beobachtungen, dass sich Licht in der Nähe von extrem massereichen Himmelskörpern nicht mehr geradlinig ausbreitet, sondern durch die Gravitation beeinflusst wird. Dass Photonen keine elektrische Ladung besitzen, ist sofort einleuchtend, denn sonst würde jeder Laserstrahl in der Nähe eines Magneten abgelenkt werden.

Eine weitere Teilcheneigenschaft ist, dass den Photonen ein Impuls p zugeordnet werden kann. Photonen mit höherer Energie haben einen höheren Impuls, vgl. B2.

Das Photonenmodell des Lichts:

- Licht besteht aus einzelnen Lichtteilchen, den Photonen.
- Die Photonen sind punktförmig und unteilbar.
- Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit.
- Sie haben keine elektrische Ladung.
- Jedes Photon hat eine genau festgelegte Energiemenge, die von der Lichtfarbe abhängt. Für sichtbares Licht liegt sie im Bereich von 1,80 eV bis 3,18 eV.
- Der Impuls des Photons ist abhängig von der Energie. Hierbei hat das Photon mit der höheren Energie den größeren Impuls.

Entwicklung physikalischer Modelle des Lichts

In diesem Kapitel haben Sie nun verschiedene Vorstellungen zum Phänomen „Licht" kennengelernt, die alle in der Lage sind, bestimmte Beobachtungen und experimentelle Ergebnisse zu erklären. Diese physikalischen Modelle wurden zu unterschiedlichen Zeiten formuliert und stehen darin nicht isoliert, sondern sind Ausdruck des jeweiligen physikalischen Weltbilds.

Den Anfang bildete die Vorstellung von Lichtstrahlen und -bündeln. Weil in diesem Modell einfache geometrische Konstruktionen die Bildung von Schatten oder Spiegelungen erklären können, spricht man auch von „geometrischer Optik“. Bis ins Mittelalter stellte sie den Stand der Wissenschaft dar. Weil Spiegel aber alle Farben des Lichts gleich reflektieren, war damit keine Weiterentwicklung zu einer Theorie der Farben möglich. Dies änderte sich, als es gelang, Glas und Kristalle in einer Güte zu verarbeiten, die die Herstellung von Linsen ermöglichte (13. Jahrhundert).

In dieser Zeit begann man auch, Kirchen mit großen farbigen Glasfenstern auszustatten.

Im 17. Jahrhundert verfeinerte Isaac Newton (1643-1727) die Experimente zu Farben; ihm standen jetzt auch gute Glasprismen und -linsen zur Verfügung. Darauf aufbauend entwickelte er eine Teilchen- oder Korpuskeltheorie des Lichts, die als Vorläufer des Photonenmodells betrachtet werden kann. Es gelang ihm damit, die unterschiedliche Brechung verschieden farbigen Lichts zu erklären.

B3 \ Buntglasfenster.



B4 \ Modernes Fotoobjektiv.

Das war allerdings auch möglich mit der Vorstellung von Christiaan Huygens (1629-1695), der die Meinung vertrat, dass sich Licht als Welle ausbreitet. Zunächst war es nicht möglich, einer von beiden Vorstellungen den Vorzug zu geben. Im 19. Jahrhundert führten dann jedoch immer genauere Experimente zu Interferenz und Beugung dazu, dass sich das Wellenmodell des Lichts schließlich durchsetzte.

Auch heute noch werden z. B. Fotoobjektive mit Methoden der geometrischen Optik und der Wellenoptik berechnet.

Am Ende des 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts stellten neue experimentelle Erkenntnisse das vorherrschende Weltbild in Frage. Konkret waren es Beobachtungen zur Lichtemission von erhitzten Gegenständen und Wechselwirkungen zwischen Licht und Elektronen, die Albert Einstein zur Lichtquantenhypothese führten.

Dies öffnete das weite Feld der Quantenphysik, die unser heutiges Verständnis von Licht und Materie bestimmt.

Das bedeutet nun jedoch nicht, dass die vorangegangenen Modelle „falsch“ sind. Vielmehr bleibt festzuhalten, dass diese Modelle für unterschiedliche Beobachtungen sehr gute Erklärungen liefern. Mit dem Photonenmodell lassen sich die Strukturen von Absorptions- und Emissionsspektren gut erklären, also Experimente, bei denen Licht mit Materie in Wechselwirkung tritt. Das Wellenmodell wird besonders im Zusammenhang mit Beugung und Interferenz von Licht verwendet, also immer dann, wenn es um die Ausbreitung von Licht geht. Und auch das Strahlenmodell sollte nicht vergessen werden, da es sehr gut für einfache Erklärungen, z. B. für Reflexionen, funktioniert.

Die verschiedenen Modelle für das Licht – das Strahlenmodell, das Photonenmodell und das Wellenmodell – sind für unterschiedliche Situationen gut geeignet, Erklärungen zu liefern. So ist das Strahlenmodell besonders für die Erklärung von einfachen Phänomenen gut anwendbar, das Photonenmodell bei Wechselwirkung von Licht mit Materie und das Wellenmodell bei der Ausbreitung von Licht.

Vergleich dreier Modelle für das Licht

Die drei verschiedenen Modelle für das Licht sind in der folgenden Tabelle einander gegenübergestellt. Je nach betrachtetem Experiment können Erklärungen mit dem einen oder mit dem anderen Modell einfacher sein. Der Widerspruch, dass ein Photon sowohl Eigenschaften eines Teilchens als auch einer Welle haben kann, wurde erst in der Quantenphysik durch den sogenannten Teilchen-Welle-Dualismus aufgelöst.

	Strahlenmodell	Photonenmodell	Wellenmodell
Beschreibung des Lichts	Licht breitet sich strahlenförmig aus. Dabei gehen die Lichtstrahlen radialsymmetrisch von der Lichtquelle aus.	Licht besteht aus einem Strom aus einzelnen Teilchen, den Photonen.	Licht breitet sich wellenförmig aus. Jeder Punkt der Wellenfront kann als Ausgangspunkt einer kreisförmigen Elementarwelle angesehen werden.
Zugeordnete Eigenschaften	Die Lichtstrahlen breiten sich geradlinig aus.	Die Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit, Energie und Impuls der Photonen hängen von der Farbe des Lichts ab.	Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Lichtgeschwindigkeit, die Wellenlänge beschreibt die Farbe des Lichts, die Amplitude die Lichtintensität.
Geeignet zur Erklärung dieser Experimente	Schatten, Reflexion, Brechung	Absorptions- und Emissionsspektren, Lichtdruck, Photoeffekt	Beugung, Interferenz, Streuung

Ausblick: Der Photoeffekt beschreibt ein Experiment, bei dem Licht genügend großer Energie Elektronen aus Metallen auslösen kann. Für seine Deutung hat A. Einstein die Lichtquantenhypothese aufgestellt.

Methode

Die Anwendbarkeit von Modellen

Modelle für physikalische Sachverhalte werden entwickelt, um beobachtete Phänomene erklären zu können und Vorhersagen über das Verhalten bei weiteren Experimenten zu treffen. Dabei werden stets Vereinfachungen vorgenommen oder Annahmen über nicht direkt beobachtbare Eigenschaften getroffen, die die Erklärung erleichtern. Eine vollständige Beschreibung der Wirklichkeit lässt sich durch die Modelle aber nicht erreichen, weshalb oft mehrere Modelle parallel verwendet werden.

Folgende Fragen können dabei helfen, einzuschätzen, wie gut ein Modell für die jeweilige Situation anwendbar ist:

- Für welchen Adressaten ist das Modell entwickelt worden?
- Welchen historischen Hintergrund hat das Modell?
- Welche Vorhersage macht das Modell über den Ausgang des Experiments? Bestätigt das Experiment die Vorhersage? Falls nicht: Kann das Modell angepasst bzw. erweitert werden?

Musteraufgabe

Vergleichen Sie zwei rote Laser mit exakt gleicher Farbe, aber unterschiedlichen Leistungen von 0,5 mW und 1 mW in den drei Modellen für das Licht. Nennen Sie außerdem jeweils eine physikalische Situation, die mit dem jeweiligen Modell gut erklärt werden kann.

Lösung

Im *Lichtstrahlmodell* werden bei dem 1-mW-Laser doppelt so viele Lichtstrahlen gezeichnet wie bei dem 0,5-mW-Laser. Die Lichtfarbe wird in diesem Modell nicht beschrieben. Man könnte damit die Reflexion an einem Spiegel gut beschreiben oder auch die Aufweitung des Laserstrahls, je weiter man von der Lichtquelle entfernt ist.

Im *Photonenmodell* haben die Photonen beider Laser die gleiche Energie und den gleichen Impuls, aber der 1-mW-Laser sendet doppelt so viele Photonen pro Sekunde aus wie der 0,5-mW-Laser. Das Modell eignet sich gut für Absorptionsversuche, in denen Gase mit Laserlicht angeregt werden sollen.

Im *Wellenmodell* haben die Wellen der beiden Laser die gleiche Wellenlänge und die gleiche Geschwindigkeit, aber die Wellen des 1-mW-Laser haben eine größere Amplitude als die des 0,5-mW-Lasers. Hiermit könnte man z. B. gut die Beugung von Laserlicht am Spalt beschreiben.

Arbeitsaufträge

1 \ Eine Lehrerin erklärt in der neunten Klasse die Lichtemission im Photonenmodell folgendermaßen: „*Wenn das Elektron im Atom auf ein niedrigeres Energieniveau gelangt, dann wird ein Photon ausgesendet. Dieses Photon kann man sich als Strichmännchen vorstellen. Es hat einen Rucksack mit einer ganz bestimmten Energieportion dabei und es packt auch nur Energieportionen mit ganz bestimmten Energiewerten in den Rucksack ein.*“
Beurteilen Sie das Modell in Bezug auf die physikalische Situation der Lichtemission. Gehen Sie dabei auf folgende Kriterien ein: physikalische Korrektheit der Erklärung; Alltagsbezug für die Schülerinnen und Schüler; Erweiterungsmöglichkeiten des Modells; mögliche Fehlvorstellungen bei den Schülerinnen und Schülern.

2 \ Beurteilen Sie, ob das Wellenmodell für Licht auch zur Erklärung der Emissionsspektren geeignet ist.

3 \ Sowohl Newton als auch Huygens konnten mit ihren Modellen des Lichts die Brechung erklären, z. B. beim Übergang von Luft nach Glas. Allerdings unterschieden sie sich in ihren Vorhersagen zur Lichtgeschwindigkeit: Während nach dem Modell von Newton die Lichtgeschwindigkeit im Glas größer sein sollte als in Luft, musste Huygens in seinem Modell das Gegenteil annehmen. Heute ist gesichert, dass das Wellenmodell die korrekte Voraussage machte.

a) Recherchieren Sie experimentelle Anordnungen, mit denen im 19. Jahrhundert genaue Messungen der Lichtgeschwindigkeit vorgenommen wurden. Wichtige Physiker in diesem Zusammenhang waren Armand Fizeau und Léon Foucault.

b) Begründen Sie, dass mit solchen Experimenten Theorien niemals endgültig bestätigt werden, sondern nur nicht zutreffende Theorien ausgeschlossen werden können. Man spricht hier auch von „Falsifizierbarkeit“.

4 \ Das Photonenmodell war in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sehr umstritten. So ist von Niels Bohr, einem Atom- und Quanten-Physiker, folgendes Zitat überliefert: „*Wenn Einstein mir ein Radiotelegramm schickt, er habe nun die Teilchennatur des Lichtes endgültig bewiesen, so kommt das Telegramm nur an, weil Licht eine Welle ist.*“
Erklären Sie, was Niels Bohr mit diesem Satz aussagen wollte.

5 \ Auch über den Aufbau der Materie gab es lange Zeit verschiedene Vorstellungen und Modelle, bis sich im 20. Jahrhundert die Atomvorstellung durchsetzte.

a) Beschreiben Sie Experimente und Beobachtungen, die zu unserem heutigen Weltbild führten, dass alle Gegenstände aus Atomen aufgebaut sind.

b) In Ihrem Physikunterricht haben Sie trotzdem Situationen erlebt, in denen Materie als kontinuierliche Menge behandelt wurde. Nennen Sie solche Situationen und beurteilen Sie, ob in ihnen die Vernachlässigung des atomaren Aufbaus der Materie gerechtfertigt werden kann.

Vermischte Aufgaben

Basisaufgaben

1 Definieren Sie den Begriff „harmonische Schwingung“.

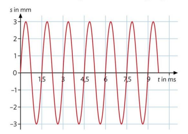
2 a) Nennen Sie drei Modelle zur Beschreibung von Licht und jeweils ein Experiment, das mit dem Modell erklärt werden kann.



b) Hält man eine weiße Feder vor eine weiße Lichtquelle, schimmert sie schwach in den Farben des Regenbogens. Erklären Sie diesen Effekt anhand eines der drei Modelle.

3 Eine Stimmgabel für das eingestrichene c (c') schwingt mit der Frequenz 262 Hz. Berechnen Sie die Schwingungsdauer und die Wellenlänge der zugehörigen Schallwelle. Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt ca. 343 $\frac{m}{s}$.

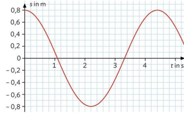
4 a) Ermitteln Sie aus dem Schwingungsdiagramm die Amplitude, die Schwingungsdauer und die Frequenz der Schwingung.



b) Stellen Sie die Schwingungsgleichung zu den in a) ermittelten Werten auf.

5 Weißes Licht wird mithilfe eines Doppelspalts in die Spektralfarben zerlegt.
Beschreiben und erklären Sie das Bild, das man auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt sehen kann.
Erklären Sie kurz den Unterschied dieser Spektralfarbenzerlegung zur Spektralfarbenzerlegung von weißem Licht mithilfe eines Glasprismas. Wählen Sie dafür jeweils ein passendes Lichtmodell und begründen Sie Ihre Wahl.

6 Ein Affe schwingt an einer Liane vor und zurück. Dabei ergibt sich folgendes t-s-Diagramm:



a) Ermitteln Sie aus dem Diagramm die Amplitude, die Schwingungsdauer und die Frequenz der Schwingung.

b) Schätzen Sie aus dem Diagramm die maximale Geschwindigkeit des Affen ab und zeichnen Sie damit das t-v-Diagramm der Bewegung. Denken Sie auch daran, die Achsen zu beschriften.

7 Geben Sie für die zwei- und dreidimensionalen Wellenformen auf S. 69 jeweils an, ob sie als Transversal- oder als Longitudinalwelle auftreten können. Begründen Sie Ihre Entscheidung.

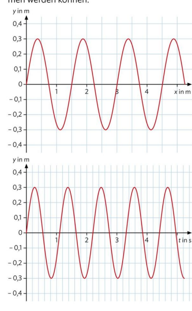
8 Schallwellen breiten sich in Luft mit ca. 343 $\frac{m}{s}$ aus, in Wasser beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls ca. 1483 $\frac{m}{s}$.

a) In einem Experiment werden zwei Schallwellen gleicher Frequenz erzeugt. Die eine bewegt sich durch Luft, die andere durch Wasser. Formulieren Sie eine Aussage über die jeweiligen Wellenlängen.

b) Sie schlagen an einen Eisenstab, der in ein Wasserbecken hineinragt. Bestimmen Sie die Länge des Wasserbeckens so, dass der durch den Schlag erzeugte Schall in der Luft 1,0 s länger benötigt als im Wasser.

9 Informieren Sie sich aus geeigneten Quellen über die bei Kopfhörern mit aktiver Geräuschunterdrückung verwendete Technik und verfassen Sie einen kurzen Beitrag darüber für eine Technik-Internetseite, die sich speziell an Jugendliche wendet. Geben Sie dabei auch eine kurze Bewertung zum Thema „Aktive Geräuschunterdrückung – sinnvoll oder nicht?“ ab.

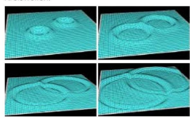
10 \ Die folgenden beiden Abbildungen zeigen Diagramme, wie sie von einer Seilwelle aufgenommen werden können.



a) Geben Sie jeweils eine experimentelle Situation an, in der die Diagramme jeweils entstanden sein könnten.
b) Bestimmen Sie aus den beiden Diagrammen die Amplitude, die Schwingungsdauer und die Wellenlänge der Seilwelle. Berechnen Sie dann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle.

11 \ Betrachten Sie noch einmal die Simulation aus M3 zu Kapitel 5 (S. 63). Stellen Sie darin die Dämpfung auf „keine“ und die Spannung auf „stark“. Außerdem soll der Wellengeber oszillieren und rechts ein festes Ende gewählt werden. Finden Sie nun eine mögliche Frequenz, mit der es zu einer stehenden Welle kommt. Vergleichen Sie Ihre Einstellung mit den anderen Lösungen in der Klasse und formulieren Sie eine Hypothese über den Zusammenhang.

12 \ Die Bildfolge zeigt die Ausbreitung von zwei Kreiswellen.



Erläutern Sie anhand dieses Beispiels die Phänomene, die bei der Überlagerung von Wellen beobachtbar sind. Gehen Sie dabei auf die Extremfälle ein, benennen Sie diese in der Fachsprache und nennen Sie in der Bildfolge je eine Stelle, an der sie auftreten.

13* \ Exkurs: Mathematisch lässt sich die eindimensionale harmonische Welle durch eine Sinusfunktion beschreiben. Anders als bei der harmonischen Schwingung hängt sie aber nicht nur von der Zeit, sondern auch vom Ort ab:

$y(x,t) = A \cdot \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$

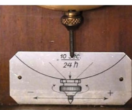
Wie bereits in Kap. 4.2 wird auch hier wieder das Bogenmaß verwendet.
Untersuchen Sie die Funktionsgleichung der eindimensionalen harmonischen Welle (vgl. dazu auch B4 auf S. 67) mit einer geeigneten Software. Das kann z. B. ein Programm zur dynamischen Geometrie oder ein CAS sein, das Funktionsgraphen darstellen kann.

a) Erzeugen Sie ein *t*-*y*- und ein *x*-*y*-Diagramm. Verändern Sie die Werte der Parameter *A*, *T* und *λ*. Beschreiben Sie ihren Einfluss auf die Graphen.
b) Animieren Sie das *x*-*y*-Diagramm, indem Sie z. B. einen Schieberegler für t einbauen.
c) Begründen Sie, dass durch die Formel
$y(x,t) = A \cdot \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right)\right]$
eine *nach links* laufende Welle beschrieben wird. Nennen Sie dazu den Unterschied zur Gleichung oben und beschreiben Sie seine Auswirkungen. Stellen Sie diese Welle wieder mit einer geeigneten Software dar.

Zusammenfassende Aufgaben

14 \ Pendeluhren





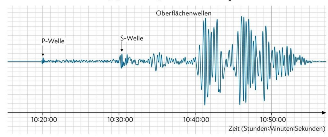
Bei Pendeluhren wird die Bewegung der Zeiger durch die Schwingungsdauer des Uhrenpendels reguliert.

a) Begründen Sie, dass diese Schwingungsdauer nicht mit der Formel berechnet werden kann, die Sie in Kap. 4.3 gefunden haben. Formulieren Sie Kriterien für den Anwendungsbereich dieser Formel.

b) Auf der Abbildung erkennt man unterhalb des eigentlichen Pendelkörpers eine kleine Stellschraube, die zum Pendelkörper hin oder von ihm weg bewegt werden kann. Erklären Sie ihre Funktionsweise und beziehen Sie dabei die Aufschrift am unteren Rand mit ein (vgl. vergrößerten Bildausschnitt rechts).

15 \ Seismische Wellen bei Erdbeben

Bei Erdbeben entstehen verschiedene Arten von sogenannten „seismischen Wellen“. Man unterscheidet hauptsächlich die schnelleren, longitudinalen P-Wellen („primär“) und die langsameren, transversalen S-Wellen („sekundär“). Beide Wellenarten laufen auch in größeren Tiefen quer durch den Erdkörper. Eine dritte Art der seismischen Wellen stellen die Oberflächenwellen dar. Sie besitzen von allen Arten die größte Amplitude und haben eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 3500 $\frac{m}{s}$.



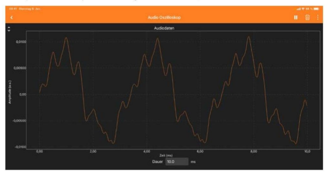
a) Erklären Sie allgemein die Begriffe „longitudinale Welle“ und „transversale Welle“ und nennen Sie jeweils ein weiteres Beispiel.

b) Schätzen Sie aus dem Diagramm die Schwingungsdauer der Oberflächenwellen ab und berechnen Sie damit die Wellenlänge dieser Erdbebenwellen.

c) Weil sich die P-Wellen schneller ausbreiten als die S-Wellen, lässt sich aus der unterschiedlichen Ankunftszeit die Entfernung des Epizentrums vom Beobachtungsort abschätzen. Verwenden Sie dafür die Daten aus dem abgebildeten Seismogramm und nehmen Sie vereinfachend folgende Ausbreitungsgeschwindigkeiten an: $c_{\text{P-Welle}} = 6{,}0\ \frac{km}{s}$ und $c_{\text{S-Welle}} = 3{,}0\ \frac{km}{s}$ an.

16 \ Trifft der Geiger den Ton?

Das Bild zeigt einen Geigenton, der mit einer Handy-App aufgenommen wurde (vgl. M1 zu Kapitel 4 auf S. 52). Die Messung hat sich über 10,0 ms erstreckt.



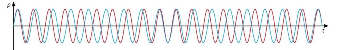
a) Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Schwingungsdauer und die Frequenz des Tons.

b) Recherchieren Sie die musikalische Bezeichnung für einen Ton dieser Frequenz und beurteilen Sie, ob der Geigenspieler den Ton „getroffen hat".

c) V Finden Sie sich in Gruppen zusammen und werten Sie verschiedene Töne eines selbst gespielten Instruments aus.

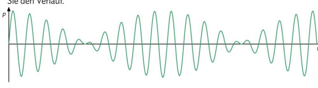
17 \ Schall von Stimmgabeln

Die Schallwellen von zwei Stimmgabeln können sich überlagern. Bei zwei leicht unterschiedlichen Frequenzen ergibt sich z. B. folgendes Bild für den Druckverlauf an einer bestimmten Stelle.



Der Schalldruck p ist dabei ein Maß für die Lautstärke des Tons und wird, wie der Luftdruck, in der Einheit Pascal (Pa) gemessen.

a) Die Gesamtamplitude des Schalldrucks zeigt die folgende Abbildung. Begründen Sie den Verlauf.



b) V Beschreiben Sie die Wahrnehmung eines Zuhörenden, der sich an der betrachteten Stelle aufhält. Führen Sie das Experiment selbst durch, z. B. indem Sie an einer von zwei gleichen Stimmgabeln eine kleine Zusatzmasse anbringen. Das in dieser Aufgabe untersuchte Phänomen heißt „Schwebung".



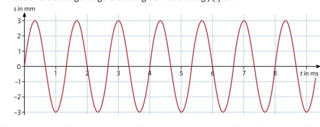
Selbsttest-Checkliste

- Bearbeiten Sie die Aufgaben schriftlich in ordentlicher Form. Die Auswertungstabelle zeigt die Kompetenzerwartungen und Hilfestellungen.
- Vergleichen Sie Ihre Lösungen mit den Lösungsskizzen auf Seite 198–201.
- Bewerten Sie nun Ihre Lösungen selbst mit den Symbolen ☺, 😐 oder ☹.

1 a) Wählen Sie ein Beispiel für eine mechanische Schwingung und erklären Sie an diesem Beispiel die charakteristischen Größen einer Schwingung: Amplitude; Periodendauer; Frequenz; Rückstellkraft; Gleichgewichtslage

b) Erläutern Sie die Kennzeichen einer harmonischen Schwingung und geben Sie zwei Beispiele für harmonische Schwingungen an.

c) Das nachfolgende Bild zeigt das *t*-*y*-Diagramm eines Federpendels. Ermitteln Sie damit die Größen Amplitude *A*, Schwingungsdauer *T* und Frequenz *f* dieser Schwingung. Geben Sie die zugehörige Gleichung der Auslenkung $y(t)$ an.



2 Sie haben im Schülerexperiment ein Experiment zur Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von verschiedenen Größen geplant und durchgeführt.

a) Benennen Sie mögliche Größen, von denen die Schwingungsdauer abhängen kann.

b) Beschreiben Sie den Aufbau und die Durchführung eines Experiments, mit dem man die Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von den in Aufgabe a) genannten Größen überprüfen kann.

c) Beschreiben Sie kurz verschiedene Möglichkeiten, um die Messungenauigkeit eines Experiments anzugeben.

d) Die beiden Tabellen zeigen einerseits gemessene Werte für die Schwingungsdauer bei einer festen Pendellänge (Tabelle 1) sowie gemessene Schwingungsdauern bei verschiedenen Pendellängen (Tabelle 2).
Bestimmen Sie bei Tabelle 1 den Mittelwert der Messungen sowie die empirische Standardabweichung als Maß für die Messunsicherheit.
Verifizieren Sie mithilfe einer graphischen Auswertung bei Tabelle 2 den quadratischen Zusammenhang zwischen Periodendauer und Pendellänge.

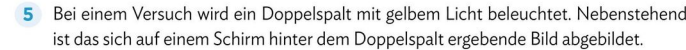
Messung Nr.	1	2	3	4	5
T in s	1,45	1,52	1,51	1,44	1,40

Pendellänge in m	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
T in s	0,90	1,12	1,28	1,43	1,55

3 a) Nennen und beschreiben Sie Alltagsbeispiele für Longitudinal- und Transversalwellen.
b) Beschreiben Sie die Ausbreitung mechanischer Wellen mithilfe des Prinzips von Huygens. Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge.

4 a) Beschreiben und erklären Sie das Wellenphänomen „Beugung".
b) Erklären Sie mithilfe des Superpositionsprinzips das Zustandekommen von konstruktiver und destruktiver Interferenz.
c) In nebenstehendem Bild sollen L_1 und L_2 zwei Lautsprecher darstellen, die beide einen Ton gleicher Frequenz f aussenden. An der Wand findet am Ort P konstruktive Interferenz statt.
Erklären Sie mithilfe des Wegunterschieds Δs das Zustandekommen der konstruktiven Interferenz an diesem Ort.
Berechnen Sie für $k = 1$ (Maximum 1. Ordnung) die Wellenlänge und die Frequenz des ausgesendeten Tons, wenn die Schallgeschwindigkeit 343 $\frac{m}{s}$ und der Wegunterschied zwischen den beiden Wellen 0,60 m beträgt.

5 Bei einem Versuch wird ein Doppelspalt mit gelbem Licht beleuchtet. Nebenstehend ist das sich auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt ergebende Bild abgebildet.



a) Erklären Sie das Zustandekommen des Bildes mithilfe des Wellenmodells des Lichts.
b) Beschreiben und erklären Sie das Bild, das man bei obigem Versuch erhält, wenn man statt des gelben Lichts rotes (bzw. blaues) Licht verwendet.

6 Vergleichen Sie das Photonen- und das Wellenmodell des Lichts.
Beschreiben Sie jeweils einen physikalischen Versuch, der sich nur mit einem der beiden Modelle des Lichts sinnvoll erklären lässt.

Auswertungstabelle

	Ich kann...	Hilfe
1	Diagramme zu verschiedenen schwingungsfähigen Systemen anhand der charakteristischen Größen beschreiben und interpretieren.	S. 52 ff
2	ein Experiment zur Bestimmung der Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von verschiedenen Größen planen, durchführen und graphisch auswerten sowie die Messunsicherheit einer mehrfach gemessenen Größe unter Verwendung statistischer Kenngrößen quantifizieren.	S. 60/61
3	Longitudinal- und Transversalwellen identifizieren und die Ausbreitung mechanischer Wellen beschreiben.	S. 62 ff
4	Beugung und Interferenz bei Wellen erklären und das Zustandekommen von konstruktiver und destruktiver Interferenz bei zwei Wellenzentren mithilfe des Wegunterschieds begründen.	S. 70 ff
5	das Schirmbild von monochromatischem Licht am Doppelspalt mithilfe des Wellenmodells des Lichts interpretieren und einen Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge des Lichts formulieren.	S. 78 ff
6	das Photonen- und das Wellenmodell des Lichts voneinander abgrenzen.	S. 86 ff

Zusammenfassung

mechanische Schwingungen

Eine mechanische Schwingung ist eine zeitlich periodische Bewegung eines Körpers um eine Gleichgewichtslage. Damit ein Körper eine Schwingung vollführen kann, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Es muss ein schwingungsfähiger Körper vorhanden sein.
- Der Körper muss aus seiner Gleichgewichtslage ausgelenkt werden.
- Es muss eine Kraft vorhanden sein, die den Körper in Richtung zur Gleichgewichtslage zurücktreibt („Rückstellkraft").

Charakteristische Größen einer Schwingung:

- Auslenkung aus der Gleichgewichtslage $s(t)$
- größte Auslenkung = Amplitude s_{max}
- Schwingungsdauer T für vollständige Schwingung
- Frequenz f = Anzahl Schwingungen pro Sekunde

Bei einer gedämpften Schwingung nimmt die Amplitude mit der Zeit ab

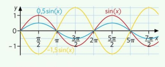
$f = \frac{1}{T}$ bzw. $T = \frac{1}{f}$

harmonische Schwingungen und Fadenpendel

Bei einer harmonischen Schwingung ist der Graph im t-s-Diagramm eine Sinuskurve. Sie tritt immer dann auf, wenn die rücktreibende Kraft direkt proportional und entgegengerichtet zur Auslenkung ist.
Ein (ideales) Fadenpendel vollführt eine harmonische Schwingung, es gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

$$s(t) = s_{max} \cdot \sin(\omega t);\ \omega = \sqrt{\frac{g}{l}};\ T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Zum Zeitpunkt $t = 0$ befindet sich das Massestück des Fadenpendels dann im Ursprung des Koordinatensystems.



g: Fallbeschleunigung
l: Fadenlänge des Pendels

Alternativ kann statt dem Sinus auch der Kosinus verwendet werden. Hier hat das Fadenpendel zum Zeitpunkt $t = 0$ die maximale Auslenkung.

mechanische Wellen

Eine mechanische Welle ist die Ausbreitung einer periodischen Auslenkung von miteinander gekoppelten schwingungsfähigen Elementen. Diese Auslenkung findet in einem Medium statt. Eine Welle überträgt Energie in Ausbreitungsrichtung, aber es findet kein Materietransport statt; Materie schwingt nur ortsgebunden.
Bei einer Transversalwelle schwingen die einzelnen Elemente senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Bei einer Longitudinalwelle schwingen sie in der Ausbreitungsrichtung.

Kenngrößen:

- Schwingungsdauer T
- Frequenz f
- Ausbreitungsgeschwindigkeit c
- Wellenlänge λ = Abstand zweier Elemente im gleichen Schwingungszustand

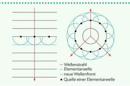
$\lambda = c \cdot T$

- Amplitude



Huygenssches Prinzip

Jeder Punkt einer Wellenfront ist Quelle einer Elementarwelle. Die Elementarwellen und die erzeugende Welle stimmen in Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit überein.
Die weiterlaufende Welle kann als Superposition einer unendlichen Zahl von Elementarwellen angesehen werden.



Beugung und Interferenz von Wellen

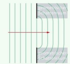
Beim Auftreffen einer Welle auf einen Spalt wird auch der geometrische Schattenraum ausgefüllt, da die Wellen am Rand der Öffnung gebeugt werden.
Wenn sich mehrere Wellen an einem Ort maximal (positiv oder negativ) verstärken, spricht man von *konstruktiver Interferenz*. Die Wellen müssen dafür gleichphasig schwingen:

$\Delta s = k \cdot \lambda$ mit $k = 0,1,2,3,...$ also $k \in \mathbb{N}$

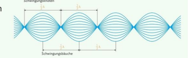
Wenn sich mehrere Wellen an einem Ort komplett auslöschen, spricht man von destruktiver Interferenz. Die Wellen müssen dafür gegenphasig schwingen:

$\Delta s = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ mit $k = 0,1,2,3,...$ also $k \in \mathbb{N}$

Eine stehende Welle entsteht durch Interferenz zweier gegenläufiger Wellen. Dabei treten jeweils im Abstand von $\frac{\lambda}{2}$ Schwingungsknoten auf; dazwischen liegen – ebenfalls im Abstand von $\frac{\lambda}{2}$ – Schwingungsbäuche.



Δs: Wegunterschied (Unterschied in den Wegstrecken, die die beiden Wellen von ihrer Quelle zurückgelegt haben)



Wellenmodell des Lichts

Licht kann als Welle betrachtet werden, die sich mit der Lichtgeschwindigkeit *c* ausbreitet. Die Wellenlänge ist abhängig von der Farbe des Lichts, die Amplitude von seiner Intensität. Im Wellenmodell des Lichts können viele Phänomene mithilfe des Huygensschen Prinzips erklärt werden.

weitere Modelle (vgl. Grundlagen S. 216/217):

- Photonenmodell
- Strahlenmodell

Je nach Situation kann eines der Modelle besser zur Erklärung herangezogen werden als das andere.

Interferenz am Doppelspalt

Beim Doppelspaltversuch mit Licht entstehen Maxima der Lichtintensität, wenn für die Wege zwischen Auftreffpunkt und den beiden Spaltmitten gilt:

$\Delta s = |s_1 - s_2| = k \cdot \lambda$ mit $k \in \mathbb{N}$

Man spricht von Interferenzmaxima k-ter Ordnung.

C \ Eigenverantwortliches Arbeiten an physikalischen Themen (EVA)

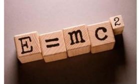
Was ist EVA?

In den nächsten Wochen werden Sie sich in einer Phase eigenverantwortlichen Arbeitens (= EVA) selbstständig einige Teilaspekte folgender Themen der Physik erarbeiten, die Einfluss auf unser Weltbild und unsere Gesellschaft haben.

7 Astronomische Weltbilder



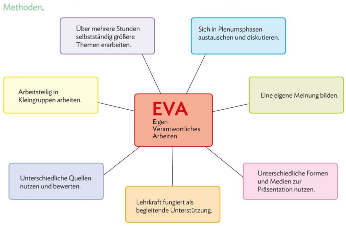
8 Einblick in die spezielle Relativitätstheorie



9 Energieversorgung



Diese beiden Doppelseiten sollen Sie dazu methodisch fit machen. Unten sehen Sie die generelle Struktur des eigenverantwortlichen Arbeitens, danach folgen eine Reihe dafür nützlicher Methoden.



Methode

Gruppenarbeit organisieren

Eine gelingende Gruppenarbeit funktioniert nach folgenden Regeln (nach H. Meyer):

- Sie sind erstens *für sich* und zweitens *für Ihre Gruppe* verantwortlich.
- Wenn Sie etwas stört, sagen Sie es den anderen Gruppenmitgliedern deutlich und verständlich.
- *Verstecken Sie sich nicht hinter anderen.* Wenn Sie etwas wollen, sagen Sie deutlich: „Ich will das so, weil ..." Achten Sie auf die Argumente der anderen und beziehen Sie sich in Ihren Begründungen darauf.
- *Bestimmen Sie eine Gruppenleitung.* Sie ist für Absprachen mit der Lehrkraft und mit den anderen Gruppen zuständig. Sie regelt die Gesprächsführung, sie achtet darauf, dass die Arbeitsplanung eingehalten und dass gemeinsame Arbeiten gerecht verteilt werden.
- Achten Sie auf die *Zeit*. Wenn Sie sehen, dass Sie vermutlich nicht bis zum abgesprochenen Zeitpunkt fertig werden, melden Sie dies der Lehrkraft rechtzeitig.
- Jede Gruppe muss dafür sorgen, dass die *Arbeitsergebnisse festgehalten* werden. Sie sollen sie nach der Gruppenarbeit in der Klasse präsentieren. Wenn im Arbeitsauftrag nichts anderes festgelegt worden ist, können Sie sich selbst aussuchen, wie Sie die Arbeitsergebnisse festhalten (vgl. Methode: Produkte für Präsentationen).

Methode

Quellen suchen

Auch, wenn es sehr gute Erklärvideos zu vielen Themen gibt, sind in der wissenschaftlichen Praxis ausschließlich *Texte* und *Abbildungen* als *Quellen* zugelassen. Aber wie finden Sie zuverlässige Quellen zu physikalischen Themen?

- Achten Sie bei Quellen im Internet darauf, dass die Seiten möglichst von ausgewiesenen *Bildungsorganisationen* sind, etwa öffentlichen Einrichtungen, *Fachzeitschriften* oder redaktionell betreuten *Bildungsportalen* wie „LEIFIphysik.de" oder „weltderphysik.de". Ein Blick ins Impressum der Seite hilft Ihnen bei der Einordnung.
- *Wissenschaftliche Suchmaschinen* wie „scholar.google.com" oder „tib.eu" helfen Ihnen, wissenschaftliche Bücher oder Zeitschriftenartikel zu finden. Manche von ihnen sind frei verfügbar, manche erhalten Sie nur über eine Bibliothek.
- Sehen Sie sich mindestens *eine weitere zuverlässige Quelle* zu dem Thema an. Decken sich die Informationen mit Ihrer ersten Quelle? Falls nein, müssen Sie noch einmal genauer recherchieren.
- Achten Sie darauf, dass Ihre *Quellen nicht zu alt* sind und somit eventuell nicht den aktuellen Stand der Forschung widerspiegeln.

Methode

Texte erschließen

Die wichtigste Quelle in der EVA-Zeit sind Sachtexte. Um einen Sachtext besser zu verstehen, können Sie (auch in Auszügen) dieses Fünf-Phasen-Schema anwenden:

1. Orientieren Sie sich im Text

- Suchen Sie das Thema.
- Machen Sie sich mit den Abbildungen vertraut.
- Überfliegen Sie den Text („skimming" - sich einen Überblick über den Text verschaffen, ihn querlesen).
- Trennen Sie offensichtliche Sinnabschnitte mit einem Strich voneinander.

2. Suchen Sie „Verstehensinseln" im Text

- „Verstehensinseln" sind die Teile eines Textes, die Sie schon verstehen und von denen die Erschließung ausgeht. Starten Sie von dem, was Sie schon verstehen.
- Markieren Sie alle Fachnomen, Fachverben und Adjektive/Adverbien farblich.

3. Erschließen Sie den Text abschnittsweise

- Erstellen Sie nun ein Begriffsnetz (Concept Map), indem Sie die Nomen auf einem Blatt Papier oder einer digitalen Arbeitsfläche aufschreiben und mit Pfeilen verbinden. Die Beschriftung der Pfeile orientiert sich an den Verben und Adjektiven.
- Setzen Sie die Verstehensinseln zueinander in Beziehung. Gehen Sie hier detailliert und gründlich vor!

4. Suchen Sie den roten Faden

- Lesen Sie den Text noch einmal und verbinden Sie die Sinnabschnitte geistig miteinander.
- Fassen Sie den Text in wenigen Sätzen zusammen.

5. Reflektieren Sie abschließend

- Suchen Sie den Sinn des Texts und ordnen Sie ihn für sich neu.
- Überprüfen Sie, was Sie verstanden haben.
- Notieren Sie, welche Fragen für Sie noch offen sind.

Methode

Quellen angeben

Sie müssen stets die Quellen angeben, die Sie für Ihre Arbeit verwenden. Damit belegen Sie Ihre Aussagen und machen sie nachprüfbar.

- Bei Büchern wird dabei mindestens der Name der Autoren, das Erscheinungsjahr, der Titel und der Verlagsort und die einzelne Seite angegeben. Beispiel:
  Quelle: Hanslmeier, A. (2020), Einführung in Astronomie und Astrophysik, Berlin, S. 129
- Internetseiten zitiert man mit dem Namen der Autoren (oder Herausgebern, Institution, Stiftung, Website, ...), Titel der Quelle, URL und Abrufdatum. Beispiel:
  Quelle: LEIFIphysik, Grundwissen Reversible und Irreversible Vorgänge, zuletzt aufgerufen am 02.05.2023, https:/www.leifiphysik.de/uebergreifend/energieentwertung/grundwissen/reversible-und-irreversible-vorgaenge
- Zeitschriftenartikel werden - auch, wenn Sie sie online abgerufen haben - angegeben mit Name, Erscheinungsjahr, Titel, Zeitschriftennamen, Jahrgang (Heftnummer), Seitenzahl. Beispiel:
  Quelle: Janssen, M., Renn, J. (2015), Einsteins Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie, Spektrum der Wissenschaft, 15(10), 48-55

Methode

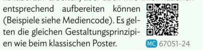
Produkte für Präsentationen erstellen

Machen Sie sich vor dem Erstellen einer Präsentation zunächst ausreichend Gedanken darüber, an wen Sie sich damit wenden möchten. Richten Sie dann die Präsentation möglichst gut an dieser Zielgruppe aus. Beispielsweise unterscheidet sich eine Präsentation für Experten eines Fachgebiets deutlich von einer für Laien, die Sie für das Thema begeistern wollen. Beantworten Sie zum besseren Einschätzen Ihrer Zielgruppe im Vorfeld unter anderem folgende Fragen:

- Wie alt ist die Zielgruppe? Das ist z. B. dafür wichtig, wie Sie die Informationen visualisieren (vgl. auch Methode auf S. 101).
- Welches Vorwissen hat die Zielgruppe? Ggf. müssten Sie zu Beginn der Präsentation zunächst einige Grundlagen erklären.
- Welche Interessen hat die Zielgruppe? Das kann dabei helfen, die Zielgruppe stärker für das Thema zu begeistern.
- Welche Erwartungen hat die Zielgruppe an Ihre Darstellung? (Erweiterung des eigenen Wissens, Einholen eines Ratschlags, Überblick verschaffen, ...)

Neben der klassischen Folienpräsentation gibt es noch weitere Möglichkeiten, um Ihre Ergebnisse zu präsentieren. Zentrale Elemente sind stets eine *klare inhaltliche Struktur* sowie *Visualisierungen und Abbildungen*, die von erklärenden Stichpunkten oder Textbausteinen begleitet werden. Natürlich müssen dabei alle verwendeten *Quellen angegeben* werden.

- **Klassisches Plakat:** Auf einem DIN-A2- oder DIN-A1-Karton können Sie Ihre Ergebnisse darstellen, zum Beispiel auch als zweidimensionale Mindmap oder Concept Map. Ein Poster muss selbsterklärend sein, das heißt, die Inhalte müssen sich alleine durch das Lesen der Texte und Betrachten der Abbildungen erschließen lassen.
- **Flyer** (Faltprospekt): Ein Flyer erfüllt zwei Funktionen: Zum einen können die Inhalte, je nach Größe und Faltweise, ansprechend und übersichtlich aufbereitet werden. Zum anderen erhalten Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler ein Produkt, das sie als Sicherung mitnehmen können. Eine besondere Form des Flyers sind Minibooks (vgl. Mediencode), die digital erstellt, als DIN-A4-Seite ausgedruckt und so gefaltet werden, dass ein kleines Buch daraus entsteht.
  MC 67051-23
- **Digitale Pinnwand:** Eine Variante zum klassischen Plakat sind digitale Arbeitsflächen, auf denen Sie kollaborativ arbeiten, aber auch Ihre Informationen entsprechend aufbereiten können (Beispiele siehe Mediencode). Es gelten die gleichen Gestaltungsprinzipien wie beim klassischen Poster.



  MC 67051-24
- **Erklärvideo:** Anders als bei einem rein visuellen Produkt können Sie in einem Erklärvideo Ihre Inhalte multimedial präsentieren. Grundlage kann eine klassische Folienpräsentation sein, deren Folien einzeln mit einem Audiokommentar besprochen und anschließend als Video exportiert werden. Eine Alternative sind Erklärvideos, die mit der Legetechnik erstellt werden. Beim Sprechen ist vor allem darauf zu achten, dass die Intonation und Modulation der Stimme abwechslungsreich und anregend sind.

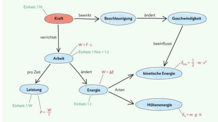
Methode

Informationen visualisieren

Visualisierungen dienen dazu, Informationen leichter erfassbar zu machen. Einen Text oder einen Zusammenhang in eine zweidimensionale, visualisierende Darstellungsform zu übertragen, ist daher eine große Hilfe für das eigene Verständnis und insbesondere für Präsentationen unerlässlich.

Mindmap

Fachinhalte werden hierarchisch gegliedert. Diese Darstellung eignet sich sehr gut für Kategorisierungen. Sie ermöglicht einen schnellen Überblick.



Conceptmap (Begriffsnetz)

Fachnomen werden durch beschriftete Pfeile miteinander verbunden, die die Beziehung zwischen den Begriffen ausdrücken. Diese Darstellung eignet sich, um wechselseitige und komplexe Beziehungen zum Ausdruck zu bringen.

Fell
hat
hat
Maus
frisst
frisst
Katze
erschreckt
Käse
ist ein
ist ein
Elefant
ist ein
Tier

Flussdiagramm

Auch hier werden Fachbegriffe mit Pfeilen verbunden. Es stehen Wirkrichtungen, Gabelungen durch Entscheidungen oder Prozesse im Vordergrund. Diese Darstellung eignet sich deshalb gut, um Abläufe, Prozesse, Wirkrichtungen und Varianten in einem System zu veranschaulichen.



Video / Animationen

Mit Videos oder Animationen lassen sich insbesondere Prozesse veranschaulichen, die nichtstatisch sind.

Diagramm

Ein Kurvendiagramm zeigt den qualitativen oder quantitativen Zusammenhang zwischen zwei Größen auf. Balken-, Säulen- oder Tortendiagramme dienen der Veranschaulichung von Zahlen oder Verhältnissen.

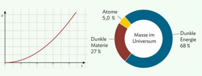
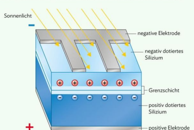


Illustration (Schaubild)

Ein Schema ist eine bildliche Vereinfachung von realen Gegenständen, kann aber auch Elemente enthalten, die in der Realität nicht sichtbar sind. In einer Illustration findet sich nur, was wichtig für das Verstehen ist. Die Kunst ist es, geeignete Reduktionen vorzunehmen. Beschriftungen sollten sich immer in unmittelbarer Nähe der bezeichneten Elemente befinden.



Foto

Natürlich ist auch das Foto eines Gegenstands oder eines Vorgangs eine Visualisierung. Hier werden Inhalte unmittelbar visuell erfahrbar.



7 Astronomische Weltbilder

Fahrplan für dieses Kapitel

Überblick

Dieses Kapitel bildet den Auftakt des eigenverantwortlichen Arbeitens, das Ihren Physik-Unterricht in den nächsten Wochen prägen wird. Hierbei reflektieren Sie die Auswirkungen bedeutsamer Beobachtungen und physikalischer Theorien auf die Entwicklung des astronomischen Weltbilds. Die dafür nötigen historischen und gesellschaftlichen Zusammenhänge erschließen Sie sich selbstständig aus verschiedenen Quellen. Dazu können Sie einerseits die im Buch abgedruckten Texte und Grafiken verwenden, andererseits werden Sie im Internet noch nach weiteren Quellen suchen müssen.
Diese Rechercheergebnisse sollen Sie immer wieder mit den Texten des Buchs vergleichen. Die Ergebnisse werden Sie unter Verwendung geeigneter Darstellungen zu einer Präsentation für Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler aufbereiten. Entscheiden Sie sich für eines der vier vorgestellten Themen und organisieren Sie Ihre Gruppenarbeit nach der Methode „Gruppenarbeit organisieren". Bearbeiten Sie anschließend in arbeitsteiliger Gruppenarbeit die Kapitel 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 oder ausgewählte Teile daraus. Lesen Sie sich die vier im Folgenden vorgestellten Themen aufmerksam durch und entscheiden Sie, welches Thema Ihnen am besten gefällt. Bearbeiten Sie dann die jeweils gestellten Arbeitsaufträge innerhalb Ihrer Gruppe. Zum Ende der Gruppenarbeit ist es wichtig, Ihre Ergebnisse den anderen Gruppen so zu präsentieren, dass diese die Aufgaben im Selbsttest am Ende des Kapitels bearbeiten können. Besonders hilfreich sind dafür die beiden Methoden: „Produkte für Präsentationen erstellen" und „Informationen visualisieren".

7.1 Vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild

Weltbilder erklären, wie Menschen die Welt wahrnehmen. In dieser Gruppe wird zunächst das geozentrische Weltbild (mit der Erde im Zentrum des Sonnensystems) und anschließend das heliozentrische Weltbild (mit der Sonne im Zentrum des Sonnensystems) erarbeitet. Wegbereiter eines neuen Weltbildes können durchaus einzelne Personen sein, wie Nikolaus Kopernikus und Isaac Newton. Der Übergang zwischen zwei Weltbildern bedeutet oftmals eine Zäsur, mit Auswirkungen für die Wissenschaft, für die Gesellschaft und besonders für einen Gelehrten wie Galileo Galilei.



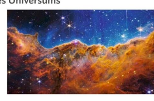
In dieser Gruppe werden Sie den Wandel der beiden physikalischen Weltbilder genauer untersuchen und die damit verbundenen Auswirkungen für unsere Gesellschaft herausstellen.

7.2 Keplersche Gesetze



Aus dem Wandel der Weltbilder ergaben sich besondere Erkenntnisse, wie die drei Keplerschen Gesetze, mit denen sich z. B. die Bewegung der Planeten vorhersagen lässt. Johannes Kepler konnte die Ellipsenbahnen dieser Bewegungen auf mathematische Art beschreiben und so auch Vorhersagen darüber treffen. Seine mathematische Herangehensweise werden Sie in dieser Gruppe untersuchen und dabei verschiedene astronomische Vorhersagen (Dauer eines Marsjahres, Zustandekommen von Jahreszeiten auf der Erde, ...) nachvollziehen.

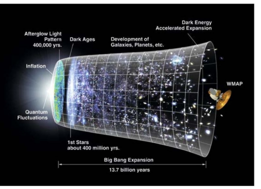
7.3 Moderne Astronomie: Aufbau des Universums



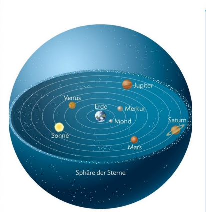
In dieser Gruppe werden Sie den generellen Aufbau des Universums weiter untersuchen. Die Planeten unseres Sonnensystems sind der Erde am nächsten, deswegen sind ihre Eigenschaften besonders interessant für uns. Außerhalb des Sonnensystems gibt es aber noch weitere Planeten, so genannte „Exoplaneten".
Der uns nächste Stern ist die Sonne. Ihr Licht gibt uns Auskunft über ihre Zusammensetzung. In Modellrechnungen kann zudem deren Vergangenheit und zukünftige Entwicklung bestimmt werden. Diese Modelle führen zu Vorhersagen über weitere Objekte des Universums, beispielsweise Roten Riesensternen oder Schwarzen Löchern.
Das Sonnensystem befindet sich in unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße. Das Zentrum einer Galaxie ist dabei ein besonderer Ort, enthält er doch ein besonders großes Schwarzes Loch.

7.4 Moderne Astronomie: Entwicklung des Universums

Der Astronom Edwin Hubble erkannte, dass unser Universum expandiert. Die Expansion soll in dieser Gruppenarbeit vorgestellt und anhand eines Modellversuchs verdeutlicht werden („Rosinenkuchen-Modell des Universums").
Dass die Expansion des Universums sogar beschleunigt abläuft, wird durch die Existenz einer „Dunklen Energie" erklärt.
Die Kosmische Hintergrundstrahlung weist auf einen Beginn des Universums in einem Urknall hin und wird daher in einem weiteren Modellversuch vorgestellt.
Aus der Modellierung kann zudem das Alter des Universums abgeschätzt werden.



M1 Geozentrisches Weltbild



Arbeitsauftrag

a) Stellen Sie das geozentrische Weltbild vor. Gehen Sie dabei auch auf dessen Probleme und die Lösung zu diesen Problemen ein. Nutzen Sie dazu weitere selbst recherchierte Quellen, die Quelle im Mediencode kann dabei als Ausgangspunkt dienen. Vergleichen Sie am Ende die selbst recherchierten Quellen mit dem Buchtext auf dieser Seite.

MC 67051-25

b) Veranschaulichen Sie das geozentrische Weltbild am Beispiel eines Balls, der an einer Schnur im Kreis geschwungen wird. Erklären Sie an diesem Beispiel auch den Widerspruch, den zum Beispiel die Beobachtung der rückläufigen Bahn des Mars zeigt.

Das oben dargestellte geozentrische Weltbild geht weit bis in die Antike zurück. Aus den physikalischen Beobachtungen, die man damals machen konnte, ging man davon aus, dass die Erde im Mittelpunkt des Universums steht. In diesem Weltbild wird sie also als ruhend angenommen und von den anderen, beobachtbaren Himmelskörpern umkreist: von Planeten, von der Sonne und von den Sternen. Ein Blick in den nächtlichen Sternenhimmel und die Schwerkraft, die stets in Richtung Erdoberfläche gerichtet ist, scheinen dieses Weltbild zu bestätigen.

Schleifenförmige Planetenbahnen

Beobachtungen über einen längeren Zeitraum zeigen, dass sich beispielsweise der Mars vor dem Sternenhintergrund auf einer scheinbar schleifenförmigen Bahn bewegt (siehe Abbildung rechts). Nach der Vorstellung des geozentrischen Weltbilds erschien eine solche Schleife zunächst nicht erklärbar. Doch bevor eine ganze Theorie in Frage gestellt wird, versuchen Wissenschaftler häufig, die bestehende Theorie an die neuen Beobachtungen anzupassen.





So erklärte Claudius Ptolemäus (100-160), u. a. Astronom und Mathematiker, die schleifenförmigen Bahnen durch die Bewegung der Planeten auf Kreisbahnen, deren Mittelpunkte sich wiederum auf Kreisbahnen bewegten (siehe Abbildung rechts). Die Himmelskörper sind dabei fixiert in sich „bewegenden Kugelschalen aus durchsichtigem Kristall“. Im Rahmen der Beobachtungsmöglichkeiten mit bloßem Auge schienen diese Erklärungen stimmig. Aus heutiger Sicht ist diese Erklärung natürlich falsch, die Himmelskörper sind nicht in irgendeinem Material fixiert sondern bewegen sich aufgrund der wirkenden physikalischen Kräfte auf ihren Bahnen.



M2 Heliozentrisches Weltbild



Arbeitsauftrag

a) Stellen Sie das heliozentrische Weltbild vor. Beschreiben Sie dabei auch kurz, wie gut das neue Weltbild von den Menschen angenommen wurde. Genaueres dazu wird in M3 weiter untersucht. Nutzen Sie dazu weitere selbst recherchierte Quellen, die Quelle im Mediencode kann dabei als Ausgangspunkt dienen. Vergleichen Sie am Ende die selbst recherchierten Quellen mit dem Buchtext auf dieser Seite.

MC 67051-26

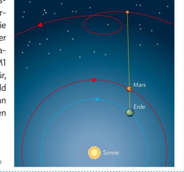
b) Erklären Sie die Beobachtung der rückläufigen Bahn des Mars im heliozentrischen Weltbild mithilfe einer Skizze von mindestens vier verschiedenen Stellungen von Erde und Mars. Vergleichen Sie diese mit Simulationen im Internet.

Im 16. und 17. Jahrhundert wurde aufgrund verschiedener physikalischer Beobachtungen, unter anderem von Nikolaus Kopernikus und Johannes Kepler, das seit vielen Jahrhunderten gültige geozentrische Weltbild durch das oben dargestellte heliozentrische Weltbild abgelöst. In M3 werden Sie genauer untersuchen, wie es dazu gekommen ist und welche gesellschaftlichen Auswirkungen das zur Folge hatte. Hier soll nun zunächst das heliozentrische Weltbild genauer beleuchtet werden.
Im Gegensatz zum geozentrischen Weltbild befindet sich in dieser Anschauung nicht die Erde im Zentrum des Universums, sondern die Sonne. Daraus ergibt sich, dass sich alle Planeten um die Sonne bewegen, die Erde benötigt dafür ein Jahr. Da sich die Erde zusätzlich einmal täglich um die eigene Achse dreht, scheinen die Sterne beim Blick in den Nachthimmel ständig ihre Position zu ändern. Tatsächlich aber können die weit entfernten Sterne als ruhende „Fixsterne" betrachtet werden. Der Mond bewegt sich zudem in etwa einem Monat um die Erde und durchläuft dabei die verschiedenen Mondphasen.

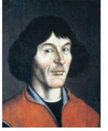
Erklärung der schleifenförmigen Planetenbahnen

Die in M1 beschriebenen, schleifenförmigen Planetenbahnen lassen sich nun mithilfe des heliozentrischen Weltbildes richtig erklären. Das geht in diesem Weltbild sogar etwas einfacher, weil die Positionen von Planteten, der Sonne und von Sternen einfacher bestimmt werden können, als dies mit den mehreren sich überlagernden Kreisbewegungen des geozentrischen Weltbildes in M1 möglich war. Diese Erkenntnis war ein wichtiger Grundstein dafür, dass das heliozentrische gegenüber dem geozentrischen Weltbild bevorzugt wurde. Rechts ist die zu beobachtende Schleifenbahn des Mars dargestellt, wenn die Erde den Mars auf der „inneren Bahn überholt". Über den Mediencode ist eine Animation verlinkt, die diese Beobachtung anhand des heliozentrischen Weltbilds veranschaulicht.

MC 67051-27



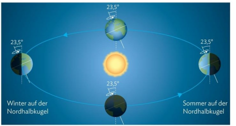
M3 Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild



Auch wenn das geozentrische Weltbild über viele Jahrhunderte allgemein anerkannt wurde, gab es doch immer wieder Zweifel an dessen Gültigkeit. Nikolaus Kopernikus (1473-1543), Domherr und Astronom, war dann einer der ersten, der sich intensiv mit der Möglichkeit eines anderen Weltbildes befasst hat. Seine Schlussfolgerungen fußten dabei nicht auf mathematischen Berechnungen, sondern aus eigenen Beobachtungen bzw. vorhandenen Kenntnissen, die auch für das geozentrische Weltbild genutzt wurden. Erst später konnte Johannes Kepler auf Basis neuer Messdaten das von Kopernikus beschriebene Weltbild weiter verfeinern und mit mathematischen Beschreibungen versehen (näheres dazu erfahren Sie von der Gruppe, die die Keplerschen Gesetze bearbeitet).
Kopernikus beschreibt also aufgrund von Beobachtungen, dass die Erde ein Planet sei und sich wie die anderen Planeten um die Sonne bewege. Damit ist er Wegbereiter des Übergangs vom geozentrischen Weltbild zum heliozentrischen Weltbild in Europa. Dieser Übergang wird auch Kopernikanische Wende genannt und hat Auswirkungen in der Wissenschaft sowie in Gesellschaft und Geschichte.

Wandel in der Wissenschaft

Die Kopernikanische Wende hatte in der Wissenschaft insofern Auswirkungen, dass ein gewisses Umdenken beim Erlangen wissenschaftlicher Erkenntnisse einsetzte. Statt sich auf den unmittelbaren Augenschein zu verlassen, wurden Erkenntnisse verstärkt durch die Kombination aus Beobachtung und Experiment gewonnen.
Eine wichtige Erkenntnis, die sich aus dem heliozentrischen



Weltbild ergibt, ist die Erklärung des Zustandekommens der Jahreszeiten: Die Bahn der Erde um die Sonne definiert eine Ebene (die sogenannte Ekliptik) und die Rotationsachse der Erde ist um 23,5° gegen die Senkrechte auf dieser Ebene geneigt (vgl. Abbildung oben). Diese Rotationsachse und damit der Neigungswinkel bleibt im Jahresverlauf unverändert. Dadurch ist im Winter die Nordhalbkugel von der Sonne weg geneigt und im Sommer entsprechend ihr zugeneigt. Der Einstrahlwinkel der Sonne auf die Erde ändert sich dadurch im Verlaufe eines Jahres, was unmittelbar zur Entstehung der Jahreszeiten führt.

Arbeitsauftrag

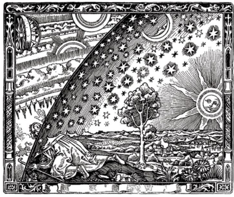
a) Stellen Sie Nikolaus Kopernikus und seinen Beitrag zum heliozentrischen Weltbild vor. Nutzen Sie dazu weitere selbst recherchierte Quellen, die Quelle im Mediencode kann dabei als Ausgangspunkt dienen. Vergleichen Sie am Ende die selbst recherchierten Quellen mit dem Buchtext auf dieser Seite.
Beschreiben Sie dabei auch den Wandel, den die Kopernikanische Wende in der Wissenschaft gebracht hat.

MC 67051-28

b) Erklären Sie die Jahreszeiten für einen Punkt auf der Nordhalbkugel mithilfe der Bahnneigung der Erdachse. Erstellen Sie dazu eine Skizze der Einstrahlwinkel der Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche zu den verschiedenen Jahreszeiten. Begründen Sie anschließend, dass sich die Änderung des Einstrahlwinkels auf die Temperatur auf der Erde auswirkt.
c) Recherchieren und präsentieren Sie den Beitrag von Isaac Newton zum heliozentrischen Weltbild.

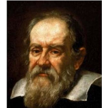
Wandel in der Gesellschaft

Neben Änderungen in der wissenschaftlichen Denkweise hatte die Kopernikanische Wende vor allem auch weitreichende gesellschaftliche Auswirkungen.



Das geozentrische Weltbild war auch tief in der Religion verankert, die den Menschen in den Mittelpunkt des Universums stellte. Plötzlich festzustellen, dass sich sprichwörtlich nicht alles „um den Menschen dreht", stellte eine große Zäsur in Religion und Philosophie dar. Der Glaube war plötzlich nicht mehr die alleinige Handlungsmaxime, sondern wurde mehr und mehr durch Vernunft und Wissenschaft ersetzt. Die politische Bedeutung des Glaubens nahm dadurch ab, was auch ein Grund ist, weshalb das heliozentrische Weltbild lange Zeit von der Kirche abgelehnt wurde.

Diese Ablehnung bekam unter anderem auch Galileo Galilei zu spüren, der ein berühmter Verfechter des von Kopernikus entwickelten heliozentrischen Weltbildes war. Galilei war ein bekannter italienischer Physiker und Philosoph, auf den zahlreiche physikalische Entdeckungen zurückgehen, unter anderem im Zusammenhang mit den Fallgesetzen. Sein Versuch, gewisse Ansichten der Kirche an das heliozentrische Weltbild und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen anzupassen, führten zu zahlreichen Konflikten mit der Kirche. Zeitgeschichtlich betrachtet markiert der Kopernikanische Wandel den Übergang vom Mittelalter zur Neuzeit.



Arbeitsauftrag

d) Recherchieren Sie die gesellschaftlichen Auswirkungen der Kopernikanischen Wende und stellen Sie die Ergebnisse vor. Über den Mediencode gelangen Sie zu einem Ausgangspunkt für Ihre Recherche.
MC 67051-29

e) Interpretieren Sie den links dargestellten Holzstich aus dem 19. Jahrhundert, der auch als „Wanderer am Weltenrand" bekannt ist.

f) Neben Kopernikus spielte vor allem auch Galileo Galilei eine wichtige Rolle im Systemwechsel. Stellen Sie seine Erkenntnisse zu den Jupiter-Monden sowie sein Ringen mit den kirchlichen Autoritäten vor. Bewerten Sie die beiden unterschiedlichen Ansichten (Galilei/Kirche). Recherchieren Sie dafür selbstständig nach geeigneten Quellen.

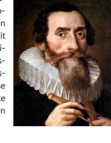
Sofern Sie noch Zeit bei der Gruppenarbeit zur Verfügung haben, können Sie auch die folgenden beiden Arbeitsaufträge bearbeiten:

g*) Untersuchen Sie ein szenisches Spiel zur Kopernikanischen Wende und präsentieren Sie es. Sie können auch Teile davon auswählen. Über den Mediencode gelangen Sie zu einer Anleitung, die Sie dabei unterstützen kann.
MC 67051-30

h*) Recherchieren Sie, in welchem Zusammenhang der Begriff „Kopernikanische Wende" in Literaturtiteln verwendet wird, und stellen Sie Ihre Ergebnisse vor.

M1 Keplersche Gesetze

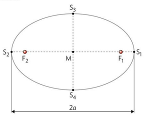
Beim ersten Gruppenthema „Vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild“ wird untersucht, wie sich im Laufe der Jahrhunderte das astronomische Weltbild gewandelt hat. Nikolaus Kopernikus war einer der ersten, der sich intensiv mit der Möglichkeit befasst hat, dass nicht die Erde im Zentrum unseres Sonnensystems (bzw. sogar das Universums) steht, sondern die Sonne. Formeln zur Berechnung von Planetenbahnen o. Ä. kommen in seinen Ausführungen allerdings nicht vor. Erst ca. 100 Jahre später gelang es dem deutschen Mathematiker, Physiker und Astronomen Johannes Kepler (1571-1630) das von Kopernikus entwickelte Weltbild mit mathematischen Gesetzmäßigkeiten (u. a. mithilfe des Gravitationsgesetzes und des Energieerhaltungssatzes) zu unterfüttern. Diese Gesetzmäßigkeiten sind noch heute gültig und als die drei „Keplerschen Gesetze“ bekannt.



1. Keplersches Gesetz

Der Kern von Keplers Ausführungen ist der, dass sich die Erde und auch die anderen Planeten des Sonnensystems auf elliptischen Bahnen um die Sonne bewegen, nicht wie von Kopernikus angenommen auf Kreisbahnen.

Mathematisch betrachtet hat eine Ellipse zwei Brennpunkte F_1 und F_2, siehe Abbildung. Diese Brennpunkte sind so definiert, dass für jeden Punkt auf der Ellipse die Summe der Abstände zu diesen beiden Brennpunkten gleich ist.



Das erste Keplersche Gesetz besagt, dass sich bei jeder der elliptischen Planetenbahnen die Sonne in einem für alle Bahnen gleichen Brennpunkt steht. Oder anders gesagt: Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

Der sonnennächste Punkt wird als Perihel bezeichnet. Befindet sich in der Abbildung die Sonne in F_2, so ist S_2 der Perihel. Die Erde auf ihrer Ellipse durchläuft den Perihel Anfang Januar mit einem Abstand von 147 Mio. km zur Sonne und den sonnenfernsten Punkt (den Aphel in S_1; gesprochen Ap-hel) Anfang Juli mit einem Abstand von 152 Mio. km.

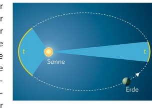
Arbeitsauftrag

a) Stellen Sie die Keplerschen Gesetze anhand des Texts M1 und weiterer Quellen vor. Recherchieren Sie dafür nach geeigneten Quellen.
b) Erklären Sie anhand des jeweiligen Abstands zwischen Erde und Sonne, dass die Ellipsenbahn der Erde um die Sonne nicht der Grund für die Jahreszeiten auf der Nordhalbkugel sein kann.
c) Erklären Sie mithilfe des 2. Keplerschen Gesetzes und einer Zeichnung, dass bei einer kreisförmigen Umlaufbahn eines Körpers um die Sonne dessen Geschwindigkeit konstant bleibt.
d) Berechnen Sie die Dauer eines Marsjahres aus geeigneten Bahndaten von Erde und Mars. Erklären Sie unter der vereinfachenden Annahme, dass sich beide Planeten auf Kreisbahnen bewegen, dass sich die Erde schneller auf dieser Bahn bewegt als der Mars.
e) Erklären Sie das Zustandekommen der Jahreszeiten, insbesondere deren unterschiedliche Tageslängen und Sonnenbahnen am Himmel.
f) Stellen Sie Johannes Kepler und seinen Weg zur Aufstellung der Keplerschen Gesetze vor. Heben Sie die wichtige Rolle, die genaue Beobachtungsdaten dabei gespielt haben, hervor. Nutzen Sie selbst recherchierte Quellen und vergleichen Sie die Inhalte mit der Quelle im Mediencode. MC 67051-31



2. Keplersches Gesetz

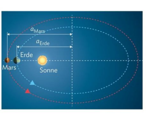
Die genaue Analyse der Beobachtungsdaten der Planeten, auf die Kepler zurückgriff, ließen ihn eine weitere entscheidende Entdeckung machen: Die Verbindungslinie zwischen der Sonne und einem Planeten, wie der Erde, schließt in der gleichen Zeitdauer Δt Flächen mit gleichem Flächeninhalt ein (blau markierte Flächeninhalte von Fläche 1 und Fläche 2 in der Abbildung). Dies bedeutet auch, dass sich ein Planet auf der elliptischen Bahn in Sonnennähe schneller bewegt als in Sonnenferne, da sich auch der Abstand zur Sonne ständig ändert. Die Erde hat am sonnennächsten Punkt (Perihel) eine Geschwindigkeit von 30,3 $\frac{km}{s}$ und am sonnenfernsten Punkt (Aphel) eine Geschwindigkeit von 29,3 $\frac{km}{s}$.



3. Keplersches Gesetz

Die dritte wichtige Erkenntnis, zu der Kepler gelang, stellt eine Beziehung zwischen den Planeten untereinander her. Die Ursache für diese Beziehung ist letztlich die Gravitationskraft, die einige Jahre später durch Isaac Newton genauer beschrieben wurde (vgl. Kapitel 3).

Für jeden Planeten im Sonnensystem ist das Quadrat seiner Umlaufdauer um die Sonne T direkt proportional zur dritten Potenz seiner großen Halbachse a – dem Abstand vom Perihel zum Mittelpunkt der Bahnellipse, vgl. Abbildung:



$\frac{T^2}{a^3} = C$

Die Konstante C wird als Kepler-Konstante bezeichnet. Für Bewegungen, bei denen die Sonne im Zentrum steht, lautet sie

$C_{Sonne} = 2{,}97 \cdot 10^{-19} \frac{s^2}{m^3}$.

Da die große Halbachse des Mars größer ist als die der Erde (vgl. Abbildung), hat der Mars eine größere Umlaufdauer um die Sonne als die Erde: $\frac{T^2_{Mars}}{a^3_{Mars}} = \frac{T^2_{Erde}}{a^3_{Erde}}$. Durch die von Kepler gefundene Gesetzmäßigkeit lässt sich also aus Beobachtungen der Umlaufdauer auch auf die Umlaufbahn eines Planeten schließen, sofern die Daten eines anderen Planeten des Systems schon bekannt sind.

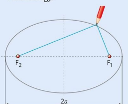
Arbeitsauftrag

Sofern Sie noch Zeit bei der Gruppenarbeit zur Verfügung haben, können Sie auch die folgenden Arbeitsaufträge bearbeiten:

g*) Stellen Sie die wichtigsten Größen und deren Zusammenhang zur Beschreibung einer Ellipse vor, insbesondere die große und kleine Halbachse, die lineare Exzentrizität sowie die beiden Brennpunkte. Recherchieren Sie dafür nach geeigneten Quellen.

h*) Vergleichen Sie die lineare Exzentrizität der Bahnen der Planeten des Sonnensystems und erklären Sie, dass der Mars gut geeignet ist, die Ellipsenbahn von Planeten durch Kepler zu entdecken.

i*) Mithilfe von zwei Stecknadeln und etwas Faden lässt sich eine Ellipse sehr einfach im Heft zeichnen („Faden- bzw. Gärtner-Konstruktion", vgl. Abbildung).



Über den Mediencode finden Sie eine Anleitung zum Vorgehen. Konstruieren Sie auf die Art eine Ellipse in Ihrem Heft. Wählen Sie als Brennpunktabstand 6 cm und als Fadenlänge 10 cm.

MC 67051-32

M1 Planetensystem der Sonne

Das Sonnensystem ist unser Planetensystem mit der Sonne als zentralem Stern. Im Sonnensystem befinden sich die unteren Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars sowie die oberen Planeten Jupiter, Saturn, Uranus, und Neptun. Diese Reihenfolge, die die Planeten nach der Entfernung zur Sonne sortiert, spiegelt sich auch im Merksatz „Mein Vater erklärt mir jeden Samstag unseren Nachthimmel" wieder.



Die unteren Planeten sind allesamt Gesteinsplaneten mit festen Oberflächen. In der Hinsicht sind diese Planeten mit der Erde vergleichbar. Die starken Abweichungen, beispielsweise bei der Entfernung zur Sonne, der Größe (und damit der Masse) oder der Zusammensetzung der Atmosphäre sorgen jedoch für grundlegende Unterschiede im Vergleich zur Erde.

Ein Tageszyklus auf dem Merkur entspricht zum Beispiel ca. 60 Erdentagen. Als sonnennächster Planet benötigt er nur wenig Zeit für einen vollen Umlauf um die Sonne (entspricht einem Merkurjahr). Dabei dreht er sich nur 1,5-mal um sich selbst, es vergehen in einem Merkurjahr also 1,5 Merkurtage. Gleichzeitig weist er von allen Planeten im Sonnensystem die größten Temperaturschwankungen zwischen Tag- und Nachtseite auf und besitzt keine Atmosphäre.

Die Venus rotiert im Vergleich zur Erde rückläufig, die Sonne geht also im Westen auf und im Osten unter. Sie hat eine dichte Atmosphäre, die fast ausschließlich aus Kohlendioxid besteht, sodass auf ihrer Oberfläche ein hoher Luftdruck und aufgrund des starken Treibhauseffektes eine hohe Temperatur herrscht – zu hoch, um Leben zu ermöglichen.

Unsere Erde besitzt durch die geneigte Rotationsachse und dem relativ massereichen Mond stabile Jahreszeiten sowie die Gezeiten Ebbe und Flut. Durch den moderaten Treibhauseffekt herrschen ideale Temperaturen für Leben und die Atmosphäre besitzt einen hohen Anteil Sauerstoff.

Der Mars besitzt ähnliche Tages- und Jahreszeitenlängen wie die Erde, seine Oberfläche ist rostrot gefärbt mit Eiskappen an den Polen. Aufgrund seiner geringeren Masse ist auch die Anziehungskraft kleiner als auf der Erde und die kaum vorhandene Atmosphäre begünstigt hohe Temperaturschwankungen.

Arbeitsauftrag

a) Erstellen Sie Steckbriefe von den acht Planeten unseres Sonnensystems. Recherchieren Sie dafür nach geeigneten Quellen im Internet und nutzen Sie den Fachtext auf dieser Doppelseite. Vergleichen Sie in Ihren Steckbriefen mindestens Größe, Sonnenabstand, Umlaufdauer, Rotationsdauer, Beschaffenheit von Oberfläche und Atmosphäre, Temperatur und ihre Schwankung sowie die Voraussetzungen für Leben.

b) Vergleichen Sie abschließend die Angaben aus den von Ihnen recherchierten Quellen mit denen auf dieser Doppelseite. Listen Sie eventuelle Unterschiede auf und beurteilen Sie, ob die Unterschiede auf Vereinfachungen basieren oder ob es gänzlich widersprüchliche Angaben sind.

Die oberen Planeten unseres Sonnensystems sind Gasriesen und bestehen hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium, wobei manche von ihnen auch einen festen Kern besitzen. Der Jupiter ist nicht nur der größte Planet im System, sondern besitzt auch zahlreiche Monde, die teilweise so groß sind, dass schon Galileo Galilei sie im 17. Jahrhundert mit einem nachgebauten Fernrohr entdecken konnte. Die Atmosphäre des Jupiters ist 1000 km dick und besitzt mit dem „Großen Roten Fleck" einen langzeitstabilen Wirbelsturm.

Der Saturn ist ebenfalls sehr groß, sein Volumen ist 760-mal größer als das der Erde! Seine Fallbeschleunigung ist aber mit $10{,}44\,\frac{m}{s^2}$ sehr ähnlich wie die der Erde, was auf die geringere Massendichte des Gasplaneten zurückzuführen ist. Er besitzt ein auffälliges Ringsystem sowie ebenfalls zahlreiche Monde, u. a. den Riesenmond Titan.

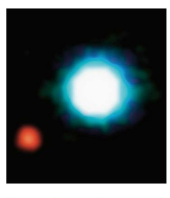
Da die Rotationsachse des Uranus in der Bahnebene der Rotation um die Sonne liegt, ist nahezu eine Hälfte des Planeten ein halbes Uranusjahr lang – entsprechend 42 Erdenjahren – hell oder dunkel.

Der Neptun ist am weitesten von der Sonne entfernt und ist als einziger Planet nicht mit bloßem Auge von der Erde zu sehen. Auf ihm herrschen Temperaturen im Bereich von -200 °C und seine charakteristische blaue Farbe wird durch das Methan in der Atmosphäre verursacht, das rotes Licht absorbiert.

Daneben sind durch die Anziehungskraft der Sonne noch weitere Körper im Sonnensystem gebunden: Zwergplaneten (z. B. Pluto), natürliche Satelliten der Planeten (z. B. Monde), und andere Kleinkörper (z. B. Asteroiden oder Kometen).

Auch außerhalb des Sonnensystems existieren Planetensysteme um zentrale Sterne, viele mit mehreren Planeten. Einige dieser Exoplaneten (von griech. exo: außerhalb) befinden sich in der habitablen Zone: Dem Abstandsbereich um den zentralen Stern, in dem Wasser dauerhaft in flüssiger Form vorliegen kann und damit eine Voraussetzung für kohlenstoffbasiertes Leben erfüllt ist. In unserem Sonnensystem befinden sich nur die Erde und der Mars in der habitablen Zone.

Die Abbildung rechts stellt das erste, je gemachte Foto eines Exoplaneten dar: Der Planet mit dem Namen 2M1207b wurde 2004 entdeckt und weist ähnliche physikalische Eigenschaften auf wie der Jupiter.



Arbeitsauftrag

Sofern Sie noch Zeit bei der Gruppenarbeit zur Verfügung haben, können Sie auch die folgenden Arbeitsaufträge bearbeiten:

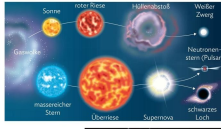
c*) Fertigen Sie ein Entfernungsmodell des Sonnensystems mit den acht Planeten an. Erklären Sie die Aufteilung des Modells in einen Teil für die unteren Planeten und einen zweiten Teil für die oberen Planeten mit den jeweiligen gemeinsamen Eigenschaften der Planeten. Nutzen Sie für Ihre Darstellung einen geeigneten Maßstab und geben Sie diesen an. Vergleichen Sie Ihr Entfernungsmodell mit weiteren Darstellungen im Internet.

d*) Erstellen Sie eine Übersicht zu den Unterschieden zwischen Gesteins- und Gasplaneten, indem Sie nach geeigneten Quellen recherchieren. Fassen Sie anschließend zusammen, wie Gas- bzw. Gesteinsplaneten entstehen.

e*) Stellen Sie einige Exoplaneten exemplarisch vor. Vergleichen Sie - wenn gegeben - Größe, Sternabstand, Umlaufdauer, Rotationsdauer, Beschaffenheit von Oberfläche und Atmosphäre, Temperatur und ihre Schwankung sowie die Voraussetzungen für Leben.

M2 Sterne

Beim Blick in den Nachthimmel sind viele Sterne in verschiedenen Farben zu sehen. Sterne entstehen durch Verdichtung von großen Gaswolken aufgrund der eigenen Gravitationskraft. Sobald Druck und Temperatur hoch genug sind, fusioniert Wasserstoff zu Helium und die dabei frei gesetzte Energie bringt den Stern zum Leuchten. Unsere Sonne hat eine Temperatur von 15 Mio. K im Kern und 5800 K an der Oberfläche; sie leuchtet gelb und wird in Spektralklasse G eingeordnet (vgl. Abbildung). Sterne mit sehr hoher Oberflächentemperatur leuchten im blauen Bereich. Sterne mit geringerer Oberflächentemperatur als die Sonne leuchten im roten Bereich.



Sterne entwickeln sich und verwandeln sich in weitere Objekte. Sobald unsere Sonne in 5 Milliarden Jahren ihren „Brennvorrat" an Wasserstoff im Kern aufgebraucht hat, startet die Fusion in höheren Schichten und sie wird zu einem Roten Riesen, der schließlich seine Hülle als planetarer Nebel abstößt und den Kern als Weißen Zwerg zurücklässt, der dann langsam verglüht (vgl. Darstellung rechts).



Sterne mit der zehnfachen Sonnenmasse oder mehr können am Ende des Wasserstoff-Brennens im Kern aufgrund der höheren Temperaturen die Fusionsprodukte – beispielsweise Helium – weiter fusionieren. Da zusätzlich das Wasserstoff-Brennen in höheren Schichten stattfindet, werden diese Sterne zu Roten Überriesen und explodieren schließlich in einer Supernova. Der dargestellte Krebsnebel ist der Überrest einer solchen Supernova-Explosion. Die Roten Überriesen lassen ihren Kern als Neutronenstern, bei Sternen mit mehr als der 30-fachen Sonnenmasse als Schwarzes Loch zurück, dessen enormer Anziehungskraft nicht einmal Licht entkommen kann.

Arbeitsauftrag

a) Stellen Sie das Spektrum der Sonne vor und erklären Sie die Existenz von Fraunhoferlinien. Vergleichen Sie das Auftreten der dunklen Striche im Spektrum mit denen in den Spektren von Sternen anderer Spektralklassen. Nutzen Sie dafür die über den Mediencode verlinkte Quelle sowie weitere, selbst recherchierte Quellen aus dem Internet. Vergleichen Sie die beiden Quellen miteinander (Nützlichkeit, Informationsgehalt, Verständlichkeit, ...). Erstellen Sie abschließend eine geeignete Präsentation Ihrer Ergebnisse für Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler.

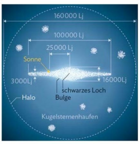
MC 67051-33

b*) Stellen Sie anhand selbst recherchierter Quellen die Entwicklung der Sonne in der Vergangenheit und die voraussichtliche Entwicklung in der Zukunft dar (z. B. in Form eines Zeitstrahls).

M3 Milchstraße und Lokale Gruppe

Die Milchstraße ist die Galaxie, in der sich unser Sonnensystem mit der Erde befindet. Sie ist eine Balkenspiralgalaxie und enthält etwa 100 Milliarden Sterne, die in einer Scheibe angeordnet sind. Am Nachthimmel sind die Sterne der Milchstraße daher als weißes Band zu sehen, da wir uns ebenfalls in dieser Scheibe befinden. Die Position unserer Sonne ist in der Abbildung markiert.





Die Scheibe enthält große Mengen Gas und Staub sowie, insbesondere in den Spiralarmen, zahlreiche noch „junge" Sterne (was dann trotzdem einem Alter von vielen Millionen Jahren entsprechen kann). Der zentrale Bereich (auch „Bulge" genannt) enthält weitere Sterne und im Zentrum ein Schwarzes Loch von 4 Mio. Sonnenmassen, um das alle anderen Sterne der Milchstraße kreisen.

Unsere Sonne bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 220 $\frac{km}{s}$ um das Zentrum der Milchstraße. Dies ist tatsächlich schneller, als sich aus dem 3. Keplerschen Gesetz und der ermittelten Masse der Milchstraße ergeben würde. Wissenschaftler haben daher die Existenz einer sogenannten „Dunklen Materie" postuliert, die für uns bisher unsichtbar ist, durch ihre Gravitationskraft aber die Sterne stärker beschleunigt. Woraus die Dunkle Materie besteht, ist unklar.

Lokale Gruppe

Die Milchstraße befindet sich mit über 70 weiteren Galaxien im Galaxienhaufen „Lokale Gruppe". Die „Lokale Gruppe" hat einen Durchmesser von 8 Mio. Lichtjahren. 1 Lichtjahr = 1 Lj entspricht 9,5 Billionen Kilometern und ist die Strecke, die Licht in einem Jahr zurücklegen kann. Das beobachtbare Universum hat einen Durchmesser von etwa 90 Milliarden Lichtjahren und enthält ca. 2 Billionen Galaxien. Damit diese Galaxien durch ihre Schwerkraft zusammengehalten werden können, müssten in der Lokalen Gruppe etwa 80 % Dunkle Materie enthalten sein.

Arbeitsauftrag

a) Erstellen Sie anhand eigener Recherchen einen Steckbrief der Milchstraße mit ihren Armen. Stellen Sie mindestens Größe, Abstand zum Zentrum, Umlaufdauer der Sonne sowie ihre Lage in der Scheibe dar.

b) Stellen Sie anhand der Milchstraße Gründe für das Vorhandensein von Dunkler Materie vor. Recherchieren Sie, aus was dunkle Materie bestehen könnte. Nutzen Sie die im Mediencode hinterlegte Quelle sowie weitere, selbst recherchierte Quellen aus dem Internet. Vergleichen Sie die Inhalte der Quellen miteinander und präsentieren Sie Ihre Ergebnisse der Klasse.

MC 67051-34

c) Stellen Sie die Klassifizierung von Galaxien in Galaxientypen vor, möglichst mit beispielhaften Bildern oder Skizzen von Galaxien. Vergleichen Sie dabei mindestens Form, Arme und das Vorhandensein eines Balkens.

d*) Im Zentrum der Milchstraße befindet sich ein besonders interessantes Objekt. Sammeln Sie hierzu Informationen, Bilder und Grafiken. Vergleichen Sie die Masse und die Größe dieses Objekts mit denen eines Schwarzen Lochs am Ende der Sternentwicklung.

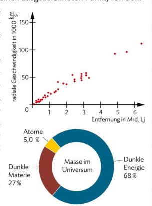
M1 Expansion des Universums



In den 1920er Jahren konnte anhand verschiedener Beobachtungen, unter anderem von Edwin Hubble (vgl. Abbildung) und Vesto Slipher, festgestellt werden, dass sich die anderen Galaxien des Universums von unserer Milchstraße entfernen. Dafür konnte auch eine Gesetzmäßigkeit gefunden werden, die eine direkte Proportionalität herstellt zwischen der Entfernung einer Galaxie zu uns und der Geschwindigkeit, mit der sich diese Galaxie von uns entfernt. Im Diagramm sind diese beiden Größen für verschiedene Galaxien gegeneinander aufgetragen. 1 Lichtjahr = 1 Lj entspricht 9,5 Billionen Kilometer; das ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Die Proportionalitätskonstante dieser Gesetzmäßigkeit wird als Hubble-Konstante bezeichnet.

Es lässt sich beobachten, dass sich alle Galaxien von uns entfernen und sich das Universum somit ausdehnt. Da sich der Raum selbst ausdehnt, gibt es keinen ausgezeichneten Punkt, von dem sich alle Galaxien wegbewegen würden (vgl. auch Arbeitsauftrag b). Es gibt also keinen Mittelpunkt des Universums (wie er im geo- bzw. heliozentrischen Weltbild angenommen wurde; näheres dazu wird Ihnen die Gruppe 1 berichten), obwohl sich alle Galaxien von uns entfernen.

Die von Erwin Hubble formulierte Gesetzmäßigkeit deutet auf eine gleichmäßige Expansion des Universums hin (der Luftballon in Arbeitsauftrag b) wird also gleichmäßig aufgeblasen). Spätere Messungen zeigen allerdings, dass diese Expansion tatsächlich nicht konstant verläuft, sondern zunimmt. Es findet also eine Beschleunigung statt, für die gemäß der Newtonschen Gesetze Energie aufgewendet werden muss. Für deren Ursprung gibt es allerdings bis heute noch keine gesicherte physikalische Erklärung. Wissenschaftler bezeichnen diese für sie nicht direkt messbare Energie deswegen als Dunkle Energie. Um die beobachtete Expansion des Universums zu erklären, muss sie sogar den größten Teil der Energie des Universums ausmachen und ist daher eines der größten wissenschaftlichen Rätsel unserer Zeit.



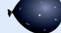
Arbeitsauftrag

a) Erläutern Sie die Expansion des Universums. Nutzen Sie dafür den Fachtext oben sowie weitere, selbst recherchierte Quellen aus dem Internet. Vergleichen Sie die Inhalte der Quellen miteinander.

b) Führen Sie ein Modellexperiment des expandierenden Raumes mithilfe eines Luftballons durch. Zeigen Sie, dass sich die Abstände von Punkten auf der Oberfläche in einer gewissen Zeitdauer des Aufblasens verdoppeln und dass die zweidimensionale Oberfläche des Luftballons ebenfalls keinen Mittelpunkt der Expansion besitzt. Recherchieren Sie nach dem Rosinenkuchen-Modell des expandierenden Raumes und vergleichen Sie dieses mit den Ergebnissen Ihres Modellexperiments.

V





c) Präsentieren Sie Ihre Ergebnisse aus a) und b) der Klasse.

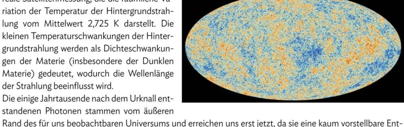
Sofern Sie noch Zeit bei der Gruppenarbeit zur Verfügung haben, können Sie auch den folgenden Arbeitsauftrag bearbeiten:

d*) Stellen Sie die Idee der angenommenen Dunklen Energie vor, die für eine beschleunigte Expansion des Universums benötigt wird. Nennen Sie ein paar der Theorien für den Ursprung der Dunklen Energie.

M2 Urknall

Wie in M1 beschrieben, nimmt die Expansionsgeschwindigkeit des Universums mit der Entfernung immer weiter zu (Hubble-Beziehung). Über den Ausgangspunkt dieser Expansion gibt es verschiedene Theorien, unter anderem die des Urknalls. Sie besagt, dass das Universum sich anfangs in einem Punkt mit unendlich hoher Energiedichte konzentriert und dann schlagartig in einem Urknall („Big Bang") ausgedehnt hat.

Eine der Voraussagen der Theorie ist, dass überall im Universum eine Wärmestrahlung messbar sein müsste, die ca. 380 000 Jahre nach dem Urknall entstanden ist. Diese Strahlung wird als kosmische Hintergrundstrahlung bezeichnet und müsste der Theorie zufolge überall im Universum die gleiche Wellenlänge haben. Und tatsächlich haben Satellitenmessungen gezeigt, dass uns aus allen Richtungen des Universums diese Hintergrundstrahlung erreicht und nur sehr geringen Schwankungen in der Wellenlänge (und damit der „Temperatur") unterlegen ist. Die Abbildung zeigt eine reale Satellitenmessung, die die räumliche Variation der Temperatur der Hintergrundstrahlung vom Mittelwert 2,725 K darstellt. Die kleinen Temperaturschwankungen der Hintergrundstrahlung werden als Dichteschwankungen der Materie (insbesondere der Dunklen Materie) gedeutet, wodurch die Wellenlänge der Strahlung beeinflusst wird.



Die einige Jahrtausende nach dem Urknall entstandenen Photonen stammen vom äußeren Rand des für uns beobachtbaren Universums und erreichen uns erst jetzt, da sie eine kaum vorstellbare Entfernung zurücklegen mussten. Vergleicht man ihre Temperatur mit der in der Theorie des Urknalls vorausgesagten Temperatur von 3000 Kelvin, so kann daraus auf das Alter des Universums gesschlossen werden: Die „Abkühlung" kommt dadurch zustande, dass durch die Expansion des Universums (und die damit verbundene Ausdehnung des Raums selbst!) die Wellenlänge der Strahlung gewissermaßen „gestreckt" wird. Anhand von Modellierungen dieser Raumausdehnung kann so bestimmt werden, welche Strecke die Strahlung bis zu uns zurückgelegt hat. Und aus der Konstanz der Lichtgesschwindigkeit kann dann wiederum auf die dafür benötigt Zeit geschlossen werden. Daraus ergibt sich ein Alter des Universums von ca. 14 Milliarden Jahren.

Arbeitsauftrag

a) Informieren Sie sich über die Messergebnisse zur kosmischen Hintergrundstrahlung des Satelliten COBE, der Raumsonde WMAP und dem Weltraumteleskop Planck. Vergleichen Sie die Ergebnisse.

b) Führen Sie ein Modellexperiment zur kosmischen Hintergrundstrahlung mit einem Luftballon durch, wie es im Mediencode beschrieben wird. Vergleichen Sie die Rotverschiebung einer Lichtwelle mit Simulationen im Internet. MC 67051-35

c) Stellen Sie die Ergebnisse der Abschätzung des Alters des Universums vor. Vergleichen Sie sie mit anderen Ergebnissen im Internet, die fälschlicherweise von einer im Laufe der Zeit unveränderlichen Hubble-Konstanten ausgehen.

Sofern Sie noch Zeit bei der Gruppenarbeit zur Verfügung haben, können Sie auch den folgenden Arbeitsauftrag bearbeiten:

d*) Stellen Sie die sogenannte heiße Anfangsphase des Universums vor (z. B. durch einen Zeitstrahl). Hilfreiche Informationen finden Sie unter anderem über den Mediencode.



MC 67051-36

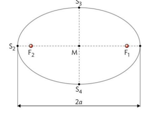


Selbsttest-Checkliste

- ✓ Bearbeiten Sie die Aufgaben schriftlich in ordentlicher Form. Die Auswertungstabelle zeigt die Kompetenzerwartungen und Hilfestellungen.
- ✓ Vergleichen Sie Ihre Lösungen mit den Lösungsskizzen auf Seite 202-203.
- ✓ Bewerten Sie nun Ihre Lösungen selbst mit den Symbolen ☺, 😐 oder ☹.

1 a) Beschreiben Sie das geozentrische und das heliozentrische Weltbild.
b) Erklären Sie den Begriff „Kopernikanische Wende".
c) Erläutern Sie, dass das heliozentrische Weltbild ebenfalls ein historisches Weltbild darstellt und nicht dem aktuellen Weltbild entspricht.

2 a) Fassen Sie die Aussagen der drei Keplerschen Gesetze zusammen.
b) Erklären Sie, wie man mithilfe der Keplerschen Gesetze die großen Halbachsen der Planetenbahnen berechnen kann. Geben Sie an, welche Größen man dazu wissen bzw. durch Beobachtungen ermitteln muss.



3 a) Sortieren Sie die Planeten unseres Sonnensystems...
① gemäß ihrer Entfernung von der Sonne.
② eingeteilt in Gesteinsplanten und Gasplaneten.
③ absteigend nach ihrer Größe.
b) Beschreiben Sie die Entwicklung unserer Sonne.
c) Skizzieren Sie unsere Milchstraße „von oben" und „von der Seite" und zeichnen Sie die ungefähre Position unserer Sonne ein. Nennen Sie wesentliche Eigenschaften unserer Milchstraße und erklären Sie den Begriff „Dunkle Materie".

4 a) Erläutern Sie die Expansion des Universums. Gehen Sie dabei auch auf den Begriff „Dunkle Energie" ein.
b) Nennen und erklären Sie einen experimentellen Nachweis für die Urknalltheorie.

Auswertungstabelle

	Ich kann...	Hilfe
1	den historischen Wandel vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild beschreiben.	S. 104ff
2	die Keplerschen Gesetze benennen und erläutern und einfache Berechnungen durchführen.	S. 108ff
3	den Aufbau unseres Planetensystems und unserer Milchstraße beschreiben und erklären.	S. 110ff
4	die Expansion des Universums erläutern und kenne einen Nachweis für die Urknalltheorie.	S. 114ff

Geozentrisches und heliozentrisches Weltbild

Das geozentrische Weltbild geht bis weit in die Antike zurück. Laut dieser Anschauung ruht die Erde im Mittelpunkt des Universums und wird von den Planeten, der Sonne und den Sternen umkreist.
Beim heliozentrischen Weltbild, das das geozentrische im 16./17. Jahrhundert abgelöst hat, steht dagegen die Sonne im Zentrum des Universums, alle Planeten und auch die Sterne kreisen um die Sonne.
Der Wechsel zum heliozentrischen Weltbild ging generell mit einem Wandel – weg von Religion, hin zur Wissenschaft - einher, der als Kopernikanische Wende bezeichnet wird.

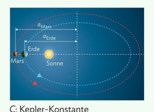
Unstimmigkeit: Erklärung schleifenförmiger Planetenbahnen

Unstimmigkeit: aus heutiger Sicht hat das Universum kein Zentrum (kosmologisches Prinzip)

Keplersche Gesetze

1. Keplersches Gesetz: Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Keplersches Gesetz: Die Verbindungslinie zwischen der Sonne und einem Planeten schließt in der gleichen Zeitdauer Δt Flächen mit gleichem Flächeninhalt ein.
3. Keplersches Gesetz: Für alle Planeten, die um das gleiche Zentralgestirn kreisen, haben die Quotienten aus dem Quadrat der Umlaufdauer T und der dritten Potenz der großen Bahnhalbachse a den selben Wert:

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = C$$



C: Kepler-Konstante

Aufbau und Entwicklung des Universums

Unser Sonnensystem besteht aus 8 Planeten, die um die Sonne kreisen: Merkur, Venus, Erde und Mars (untere Gesteinsplaneten) sowie Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun (obere Gasplaneten).
Unser Sonnensystem befindet sich in der Milchstraße, einer Balkenspiralgalaxie, die 100 Milliarden Sterne enthält, welche in einer Scheibe angeordnet sind.
Das beobachtbare Universum hat einen Durchmesser von ca. 90 Milliarden Lichtjahren und ist einer Theorie zufolge vor ca. 14 Milliarden Jahren im sogenannten „Urknall" entstanden. Seitdem dehnt es sich immer weiter und mit zunehmender Geschwindigkeit aus, wodurch der Rand des Universums weiter als die 14 Mrd. Lichtjahre entfernt ist, die das Licht ohne Berücksichtigung der Raumexpansion zurückgelegt hätte.

„**M**ein **V**ater **er**klärt **m**ir **j**eden **Sa**mstag **un**seren **N**achthimmel."

Die Bewegungen von Sternen lassen sich nicht hinreichend durch die Keplerschen Gesetze beschreiben, weshalb eine für uns nicht beobachtbare „Dunkle Materie" postuliert wurde.
Für die beschleunigte Ausdehnung des Universums wurde analog eine „Dunkle Energie" postuliert.



8 Einblick in die spezielle Relativitätstheorie

Fahrplan für dieses Kapitel

Überblick

Dieses Kapitel widmet sich der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein. Ziel des eigenverantwortlichen Arbeitens ist es, dass Sie sich einen Teilbereich dieser Theorie in Gruppenarbeit ausgehend von vorgegebenen Materialien erarbeiten, aber auch selbst Recherchen anstellen und abschließend Ihre Ergebnisse präsentieren. Teilen Sie sich dafür in drei Gruppen auf (vgl. Methode S. 99), in denen Sie die Themen „Zeitdilatation", „Längenkontraktion" und „Äthertheorie" bearbeiten. Bilden Sie anschließend *zwei weitere Gruppen*, um die „Deutsche Physik" zu bearbeiten. Alle Gruppen bearbeiten jedoch zunächst die folgende Doppelseite 120/121. Sie bietet Ihnen eine gemeinsame Grundlage für die Bearbeitung der Materialien Ihrer jeweiligen Gruppe.

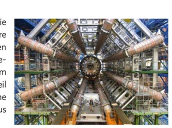
8.1 Zeitdilatation

Die Zeit scheint eine feste Größe zu sein, die an jedem Ort gleich verläuft. Albert Einstein hat allerdings bereits Anfangs des 20. Jahrhunderts dargelegt, dass die Zeit sich anders verhält, wenn man sich bewegt. In dieser Gruppe widmen Sie sich dieser Theorie und untersuchen mithilfe einer „Lichtuhr" ein spannendes Gedankenexperiment.



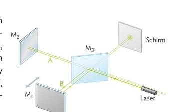
8.2 Längenkontraktion

Myonen sind sehr kurzlebige Teilchen, die sich zum Beispiel in unserer Atmosphäre bilden. Und obwohl sie wegen ihrer kurzen Lebensdauer gar nicht erst bis zur Erde gelangen dürften, können wir sie trotzdem registrieren. Das ist deshalb möglich, weil die Myonen aus ihrer eigenen Sicht eine viel kürzere Strecke zurücklegen, als aus unserer Sicht.



8.3 Äthertheorie

Noch im 19. Jahrhundert war man davon überzeugt, dass der Weltraum nicht einfach „leer" (sprich: Vakuum) sein konnte, sondern mit einem Stoff durchsetzt sein muss, dem „Äther". Michelson und Morley widerlegten diese Theorie experimentell, ebenso wie Einstein später mit seiner speziellen Relativitätstheorie.



8.4 Deutsche Physik



Zu diesem Thema sind zwei unterschiedliche Materialien vorhanden, die in zwei verschiedenen Gruppen erarbeitet werden sollen.
Auch wenn die Physik auf den ersten Blick eine objektive, von Fakten und experimentellen Ergebnissen geprägte Wissenschaft ist: Die Menschen, die diese Physik machen, sind es nicht immer. Leider spielen auch politische und gesellschaftliche Vorurteile eine Rolle, wie physikalische Erkenntnisse betrachtet werden. Die Analysen eines Textes des deutschen Nobelpreisträgers Philipp Lenard sowie einer Zeitschrift aus der Zeit des Nationalsozialismus zeigen das auf.

Nützliche Methoden

Die folgenden beiden Methoden können Sie dabei unterstützen, die Arbeitsaufträge zu bearbeiten. Beachten Sie zusätzlich die Methoden, die auf S. 99ff dargestellt sind!

Methode

Gedankenexperimente vs. reale Experimente

In einigen Bereichen der Physik ist es nicht möglich, einen Sachverhalt experimentell nachzustellen, beispielsweise wenn etwas sehr klein ist (auf atomarer Ebene) oder sehr schnell (im Bereich der Lichtgeschwindigkeit). Hierbei können Gedankenexperimente helfen (vgl. Methode S. 39).
Gedankenexperimente können vor allem dazu dienen, um die „Lücken" einer Theorie aufzudecken, wenn sich in der erdachten Situation beispielsweise Widersprüche ergeben, die mit der bisher aufgestellten Theorie nicht erklärbar sind.
Durch technischen Fortschritt oder weitere physikalische Erkenntnisse kann es passieren, dass ein Gedankenexperiment Jahre später durch eine Simulation gestützt oder auch mit einem realen Experiment überprüft werden kann. Die beiden Arten von Experimenten sind aber unbedingt voneinander zu unterscheiden: Ein reales Experiment stellt eine empirische Überprüfung einer theoretischen Überlegung dar. Ein Gedankenexperiment dagegen zieht Schlussfolgerungen innerhalb der Theorie, die aber nicht zwingend der Realität entsprechen müssen (wenn die Theorie selbst beispielsweise von falschen Annahmen ausgeht).

Methode

Kausalketten formulieren

Eine Kausalkette soll dazu dienen, um eine Aussage logisch aus einer anderen abzuleiten. Dabei sollten folgende Schritte beachtet werden:

- Die wichtigsten Fachbegriffe verwenden und in einfachen, präzisen Sätzen formulieren.
- In einzelne Abschnitte gliedern.
- Oft hilft eine Folge von Abbildungen, die genau diese Abschnitte darstellen.
- Die einzelnen Abschnitte verbinden Sie schließlich in der Kausalkette. Sie besteht aus mehreren Aussagen, die jeweils durch eine Begründung miteinander verbunden sind.

Beispiel:

Aussage: Laserlicht wird am Doppelspalt gebeugt,

Begründung: weil Laserlicht als Welle aufgefasst werden kann.

Aussage: Es entsteht am Schirm ein Interferenzmuster,

Begründung: weil die zwei halbkreisförmigen Wellenfronten miteinander interferieren.

Die 1916 von Einstein veröffentlichte allgemeine Relativitätstheorie berücksichtigt zusätzlich die Effekte auf Raum und Zeit, die durch Beschleunigung und Gravitation hervorgerufen werden.

GPS steht für „Global Positioning System".

Raum und Zeit sind relativ

Im Jahr 1905 veröffentlichte Albert Einstein seine spezielle Relativitätstheorie, bei der er Voraussagen darüber trifft, wie sich Raum und Zeit für zwei Beobachter verhalten, die sich relativ zueinander bewegen. Damals wie heute erzeugt seine Theorie große Aufmerksamkeit, weil sie unsere intuitive Vorstellung von Raum und Zeit auf den Kopf stellt. So ist beispielsweise die Zeit keine feste Größe, die sich überall gleich verhält, sondern abhängig von dem Bezugssystem, in dem sich der Beobachter befindet.

Mittlerweile wurden Einsteins Theorien durch zahlreiche Experimente überprüft und werden heutzutage auch in vielen technischen Anwendungen genutzt. So würde das satellitengesteuerte GPS, das zur präzisen Positionsbestimmung auf der Erde dient, mit der Zeit immer ungenauer, wenn man die Erkenntnisse der speziellen Relativitätstheorie nicht berücksichtigen würde (ca. 1 km Abweichung alle 12 Stunden).



B1 Mit unseren Smartphones nutzen wir das GPS zur Wegfindung.

Bezugssysteme

Im Kern der speziellen Relativitätstheorie (kurz: SRT) steht die Betrachtung von Beobachtern, welche sich mit konstanter Geschwindigkeit relativ zueinander bewegen. Jeder der Beobachter besitzt dabei ein eigenes Bezugssystem, das fest mit ihm verbunden ist. Näheres zum Thema „Bezugssysteme" können Sie in Kapitel 2.2 auf S. 26 nachlesen.

Im Folgenden wird die Bewegung eines Bezugssystems meist aus zwei verschiedenen Perspektiven betrachtet: einmal aus Sicht eines bewegten Beobachters („Kim") und einmal aus Sicht eines ruhenden Beobachters („Bruno").



B2 Bruno und Kim.

Der Begriff leitet sich vom lateinischen *inertia* ab, der „Trägheit" bedeutet.

Ein sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit bewegendes Bezugssystem ist ein Inertialsystem.

Inertialsysteme

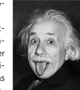
In der SRT werden sogenannte Inertialsysteme betrachtet. Dabei handelt es sich um Bezugsysteme, die nicht beschleunigt sind und auf die entsprechend von außen keine Kräfte wirken. Es muss also das 1. Newtonsche Gesetz, der Trägheitssatz, erfüllt sein, gemäß dem ein Körper seinen Bewegungszustand nicht ändert, sofern keine äußere Kraft auf ihn wirkt. Fahren Sie in einem Zug mit konstanter Geschwindigkeit, kann der Zug als Inertialsystem betrachtet werden. Erhöht der Zug seine Geschwindigkeit, erfahren Sie durch die Beschleunigung eine Kraft, die Sie in den Sitz drückt. In dem Fall ist der Zug kein Inertialsystem mehr, da von außen Kräfte einwirken.

Ein Postulat stellt eine unbewiesene Aussage dar, die aber für die darauf aufbauende Theorie als wahr vorausgesetzt werden muss.

Die Einsteinschen Postulate

Albert Einstein hat für seine spezielle Relativitätstheorie zwei Annahmen aufgestellt, die als Grundvoraussetzung für seine Theorie dienen. Das erste dieser „Postulate" wird auch das Relativitätsprinzip genannte. Es besagt, dass die physikalischen Gesetze in jedem Inertialsystem gleich sind. Ein physikalisches Experiment müsste also in zwei verschiedenen Inertialsystemen die exakt gleichen Ergebnisse liefern, sofern die Experimente in beiden Fällen identisch ablaufen. Es gibt kein Inertialsystem, das sich in absoluter Ruhe befindet. Eine Schlussfolgerung daraus ist, dass Bewegungen immer nur

relativ zueinander gemessen werden können und es keinen absoluten Bewegungszustand gibt (vgl. Aufgabe 2).
Mit seinem zweiten Postulat setzt Einstein voraus, dass die Lichtgeschwindigkeit in jedem Inertialsystem gleich groß ist, unabhängig von der Bewegung des Beobachters. Wenn ein Beobachter von seinem Inertialsystem aus das Licht in einem anderen Inertialsystem betrachtet, das sich relativ zum ihm bewegt, so ist das Licht nicht schneller oder langsamer, sondern hat exakt Lichtgeschwindigkeit (vgl. auch Aufgabe 3).


B3 \ Ein Foto von Albert Einstein.

Im Vakuum beträgt die Lichtgeschwindigkeit $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.

Einsteinsche Postulate:
1. Die physikalischen Gesetze sind in jedem Inertialsystem gleich.
2. Die Lichtgeschwindigkeit ist in jedem Inertialsystem gleich groß.

Was bedeutet „gleichzeitig"?
Intuitiv haben wir alle ein Gespür dafür, wann zwei Ereignisse „gleichzeitig" stattfinden. Bei einem 100-Meter-Lauf starten alle Sportler gleichzeitig, beim Bremsen spüren alle Insassen eines Fahrzeugs die Beschleunigung zur gleichen Zeit. Bei folgendem Beispiel ist es jedoch nicht mehr so eindeutig: Die Kirchen zweier Dörfer stehen nur wenige hundert Meter voneinander entfernt. Um Punkt 12 Uhr erklingen jeweils die Kirchenglocken. Eine Person, die genau in der Mitte zwischen den beiden Kirchen steht, würde beide Glocken zur gleichen Zeit wahrnehmen. Der Priester von Kirche A hört allerdings die Glocken von Kirche B erst etwas später, da der Schall ($v_{Schall} = 343 \frac{m}{s}$) von Kirche B eine längere Strecke bis zum Ohr des Priesters zurücklegen muss als der Schall von Kirche A. Der Priester würde also nicht sagen, dass beide Glocken gleichzeitig erklingen.
In der SRT ist es so, dass die bewegte Beobachterin Kim eine andere Wahrnehmung von Gleichzeitigkeit hat als der ruhende Beobachter Bruno. Diese Relativität der Gleichzeitigkeit werden Sie in Aufgabe 4 genauer untersuchen.


B4 \ Kirchenglocke.

Arbeitsaufträge

1 \ Begründen Sie, welche der folgenden Bezugssysteme Inertialsysteme sind: *Zug bei der Abfahrt; Fahrrad mit konstanter Geschwindigkeit; geostationärer Satellit; Aufzug; Sitz im Kettenkarussell.*

2 \ Begründen Sie anhand eines Beispiels (z. B. ein Fahrgast blickt aus einem fahrenden Zug), dass Bewegungen immer relativ zueinander gemessen werden.

3 \ Betrachten Sie folgendes Gedankenexperiment (vgl. Methode S. 119): Sie reiten auf einem Lichtbündel, bewegen sich also mit Lichtgeschwindigkeit. Ein Beobachter in einem Auto, das sich mit 100 $\frac{km}{h}$ bewegt, fährt hinter dem Lichtbündel her. Beschreiben Sie aus Ihrer Sicht und aus Sicht des Beobachters, wie weit das Licht nach einer Stunde gekommen ist. Beachten Sie dabei die Einsteinschen Postulate!

4 \ Aufbauend auf diesen Erkenntnissen lässt sich untersuchen, wie sich unsere Wahrnehmung von „Gleichzeitigkeit" in unterschiedlichen Inertialsystemen ändert. Bearbeiten Sie dazu die über den Mediencode hinterlegte Lernumgebung.


MC 67051-37

Hinweis: Diese Aufgabe sollte unbedingt vor Bearbeitung der nächsten Seiten von allen Gruppen gelöst werden!

M1 Gedankenexperiment: Die bewegte Lichtuhr - Zeitdilatation

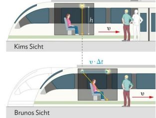
Qualitative Betrachtung

Eine der Kernaussagen aus Einsteins spezieller Relativitätstheorie ist die Zeitdilatation, die sich gut durch das folgende Gedankenexperiment veranschaulichen lässt.



Ein Zug bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit v. Zwischen zwei Spiegeln an Boden und Decke des Zugs wird ein Photon hin und her reflektiert. Für die im Zug sitzende Kim bewegt sich das Photon auf einer senkrechten Geraden, siehe Skizze. Sie misst die Zeit Δt_0, die das Photon für den Weg von der Decke zum Boden benötigt. Diese Zeit ergibt sich aus der zurückgelegten Strecke des Photons und der Lichtgeschwindigkeit. Diese „Lichtuhr" ist in Kims Inertialsystem in Ruhe.

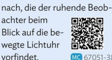
Der Zug mitsamt der Lichtuhr bewegt sich am draußen neben dem Gleis stehenden Bruno vorbei. Aus seiner Sicht bewegt sich das Photon nicht senkrecht nach unten, sondern schräg, da es sich zusammen mit dem Zug ein Stück zur Seite bewegt, siehe Skizze.



Im Inertialsystem von Bruno legt das Photon, das sich im Inertialsystem von Kim befindet, also eine längere Strecke zurück. Die Geschwindigkeit des Photons ist aber nach Einsteins Postulaten in jedem Inertialsystem gleich groß. Deswegen muss das Licht des fahrenden Zugs von Bruno aus betrachtet mehr Zeit für die Strecke von der Decke zum Boden benötigen. Bruno misst tatsächlich eine größere Zeitspanne als Kim, bis das Photon am Boden ankommt. Bruno, an dem sich die Lichtuhr vorbeibewegt, würde also nicht die Zeit Δt_0 für das Photon im Zug messen, sondern die Zeit $\Delta t > \Delta t_0$. Würde er dagegen im Zug sitzen, so würde er mit der Lichtuhr die Zeit Δt_0 messen, so wie Kim auch. Die Zeit vergeht also unterschiedlich schnell; je nachdem, ob der Beobachter von draußen auf das Geschehen blickt oder ob er sich im Zug am Ort des Geschehens befindet. Die Zeit im Inertialsystem des Geschehens vergeht demnach langsamer als in einem Inertialsystem, das sich relativ dazu bewegt. Man spricht von der „Zeitdilatation".

Arbeitsauftrag

a) Recherchieren Sie nach einer Simulation einer Lichtuhr (Beispiel: siehe Mediencode). Machen Sie sich mit der Simulation vertraut. Stellen Sie insbesondere die Situation nach, die der ruhende Beobachter beim Blick auf die bewegte Lichtuhr vorfindet.



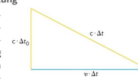
b) Recherchieren Sie nach weiteren Materialien wie Fachtexten, Erklärvideos etc. zum Thema Zeitdilatation (vgl. Methode S. 99). Stellen Sie die aus Ihrer Sicht nützlichsten Materialien zusammen und begründen Sie Ihre Auswahl. Beschreiben Sie anschließend mit eigenen Worten, wie die Zeitdilatation entsteht. Beachten Sie dabei insbesondere die Rolle der Einsteinschen Postulate.

c) Stellen Sie eine Kausalkette (vgl. Methode S. 119) auf, die die Schlussfolgerung von Einsteins Postulaten hin zur Zeitdilatation darstellt. Arbeiten Sie auch heraus, inwiefern die Zeitdilatation eine Folge der Relativität der Gleichzeitigkeit ist.

d) Recherchieren Sie nach dem Hafele-Keating-Experiment und fassen Sie Ihre Ergebnisse zusammen. Diskutieren Sie in der Gruppe darüber, wie glaubhaft Sie Einsteins Theorien finden würden, wenn diese nicht experimentell nachweisbar wären.

Quantitative Betrachtung

Wir wollen die Zeitdilatation nun quantitativ beschreiben: In der Abbildung ist nochmal der Weg des Photons aus beiden Inertialsystemen dargestellt. Δt_0 ist die Zeit, die Kim misst; das Photon legt in ihrem Inertialsystem die Strecke $c \cdot \Delta t_0$ zurück. Δt ist die Zeit, die der am Gleis stehende Bruno misst. Aus seiner Sicht legt das Photon die Strecke $c \cdot \Delta t$ zurück. Der Zug hat sich in der Zeit um $v \cdot \Delta t$ zur Seite bewegt. Mathematisch gesehen lässt sich das als rechtwinkliges Dreieck darstellen und gemäß des Satzes von Pythagoras gilt dann:



$$(c\Delta t)^2 = (c\Delta t_0)^2 + (v\Delta t)^2 \Leftrightarrow (c\Delta t_0)^2 = (c\Delta t)^2 - (v\Delta t)^2$$

$$\Rightarrow \Delta t_0^2 = \Delta t^2 - \frac{v^2}{c^2}\Delta t^2 \Leftrightarrow \Delta t_0^2 = \Delta t^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Grenzen der klassischen Mechanik

Laut den Einsteinschen Postulaten muss die Physik in jedem Inertialsystem die gleiche sein. Bisher haben Sie aber bei allen Berechnungen zu Bewegungen, z. B. bei einem Auto mit konstanter Geschwindigkeit, nie die von Einstein beschriebene Zeitdilatation berücksichtigt. Waren die Ergebnisse also alle falsch? Um das beurteilen zu können, betrachten wir die Formel für die Zeitdilatation anhand eines einfachen Beispiels: Ein Auto, das sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 30\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ fortbewegt. Die Geschwindigkeit taucht in Einsteins Formel nur im Bruch $\frac{v^2}{c^2}$ auf.

Im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit ($c \approx 300\,000\,000\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$) ist der Nenner des Bruchs also sehr viel größer als der Zähler, wodurch der Bruch sehr klein wird:

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{(30\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{(300\,000\,000\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} = 0{,}00000000000001 = 1 \cdot 10^{-14}$$

Dadurch wird die Wurzel in $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ in guter Näherung zu 1

und am Ende erhalten wir: $\Delta t \approx \Delta t_0$.

Für solche Geschwindigkeiten, wie wir sie im Alltag kennen, ist der Effekt der Zeitdilatation also so gering, dass wir ihn vernachlässigen können (er ist jedoch nicht vollständig Null!). In diesen Fällen ist es sinnvoll, „klassisch" zu rechnen, also ohne Berücksichtigung der Zeitdilatation. Dadurch kann die Rechnung vereinfacht werden. Je größer die Geschwindigkeit ist, desto größer ist die Abweichung. Diese kann daher irgendwann nicht mehr vernachlässigt werden (vgl. Aufgabe h).

e) Vollziehen Sie die quantitative Betrachtung der Zeitdilatation nach, indem Sie die Rechnung selbstständig durchführen. Nutzen Sie auch weitere, selbst recherchierte Quellen und vergleichen Sie diese mit dem nebenstehenden Text.

f) Erstellen Sie eine Beispielrechnung, bei der Sie die Zeitdilatation eines mit $v = 0{,}55 \cdot c$ fahrenden Zuges für einen ruhenden Beobachter darlegen. Gehen Sie dabei davon aus, dass das Licht im Inertialsystem des Zuges 8,0 ns für die Strecke von der Decke bis zum Boden benötigt.

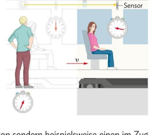
g) Vollziehen Sie das Beispiel zu den Grenzen der klassischen Mechanik nach. Berechnen Sie dafür, wie groß Δt bei einem Vorgang wäre, der im Auto in Ruhe ist.

h) In der Wissenschaft gilt die Faustregel, dass ab Geschwindigkeiten von ≈ 10 % der Lichtgeschwindigkeit die relativistischen Effekte berücksichtigt werden sollten. Bestimmen Sie für diesen Fall die Abweichung, die durch die Zeitdilatation hervorgerufen wird.

i) Erstellen Sie eine Präsentation (vgl. Methode S. 100/101), bei der Sie alle Ihre gesammelten Ergebnisse anschaulich zusammenfassen. Nutzen Sie dafür auch die Simulation der Lichtuhr sowie eventuell hilfreiche Materialien aus Ihrer Recherche, wie z. B. Erklärvideos (Quellen angeben, vgl. Methode S. 100). Verfassen Sie auch eigenständig einen Merkkasten mit den wichtigsten Erkenntnissen.

M1 Der Myonen-Zerfall - Längenkontraktion

In unserer Atmosphäre finden ständig Wechselwirkungen zwischen Teilchen statt. Bei den Zusammenstößen entstehen wieder neue Teilchen, unter anderem Myonen. Diese gehören zu den instabilen Teilchen (Halbwertszeit $t_H = 1{,}5\ \mu s$).
Die Myonen, die in ca. 10 km Höhe entstehen, haben eine Geschwindigkeit von 99,4 % der Lichtgeschwindigkeit. In 1,5 μs können diese Myonen eine Strecke von ca. 450 m zurücklegen. Nach der Strecke müsste also die Hälfte der entstandenen Myonen wieder zerfallen sein, nach 900 m dürfte nur noch $\frac{1}{4}$ vorhanden sein usw. Am Erdboden dürften dann (nach ca. 22 Halbwertszeiten) nur noch ca. $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ % der ursprünglichen Anzahl registriert werden. Tatsächlich aber sind es ca. 15 %, also über 600 000 Mal mehr!
Einsteins spezielle Relativitätstheorie liefert eine Erklärung für dieses Phänomen, die wir anhand eines Gedankenexperiments veranschaulichen wollen: Kim befindet sich in einem mit hoher, konstanter Geschwindigkeit v fahrenden Zug, während Bruno draußen am Bahnsteig steht. Zwischen zwei Spiegeln an den beiden Enden des Zugabteils wird ein Photon hin und her reflektiert. Kim misst die Zeit Δt_0, die das Photon für den Hin- und Rückweg benötigt. Diese Zeit ergibt sich aus der zurückgelegten Strecke des Photons und der Lichtgeschwindigkeit. Diese „Lichtuhr" ist in Kims Inertialsystem in Ruhe. Kim ermittelt aus der gemessenen Zeit Δt_0 die von einem Photon zurückgelegte Strecke: $2L_0 = c\Delta t_0$, wobei L_0 dann die Länge des Abteils ist.



Wenn Bruno von außen die vom Photon zurückgelegte Strecke betrachtet, so stellt sich die Situation für ihn etwas anders dar. Da sich der Zug bewegt, entfernt sich auch das Ende des Zugabteils vom Photon. Das Photon kann allerdings nicht die Geschwindigkeit v + c besitzen (wie wir es erwarten würden, wenn wir kein Photon sondern beispielsweise einen im Zug rollenden Ball betrachten würden), das würde Einsteins Postulaten widersprechen. Aus Brunos Sicht hat das Photon also die Geschwindigkeit c, egal ob sich der Zug bewegt oder nicht. Das Photon muss also zusätzlich die Strecke zurücklegen, die der Zug in der Zeit fährt. Bruno und Kim nehmen dadurch die vom Photon zurückgelegte Strecke anders wahr: Aus Kims Sicht ist sie kürzer als aus Brunos Sicht. Das ist die sogenannte Längenkontraktion.
Auf die Myonen angewendet: Im Inertialsystem der sich schnell bewegenden Myonen beträgt die bis zur Erde zurückgelegte Strecke keine 10 km, sondern gerademal 1,09 km!

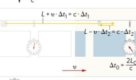
Arbeitsauftrag

a) Recherchieren Sie nach einer Simulation oder einer Animation, die die Längenkontraktion gut veranschaulicht (Beispiel: siehe Mediencode). Machen Sie sich damit vertraut und vollziehen Sie die unterschiedlichen Betrachtungen von Kim und Bruno nach. MC 67051-39
b) Recherchieren Sie nach weiteren Materialien zum Thema Längenkontraktion. Stellen Sie die aus Ihrer Sicht nützlichsten Materialien zusammen und begründen Sie Ihre Auswahl. Beschreiben Sie anschließend unter Berücksichtigung der Einsteinschen Postulate mit eigenen Worten, wie die Längenkontraktion entsteht.
c) Stellen Sie eine Kausalkette (vgl. Methode S. 119) auf, die die Schlussfolgerung von Einsteins Postulaten hin zur Längenkontraktion darstellt. Arbeiten Sie auch heraus, inwiefern die Längenkontraktion eine Folge der Relativität der Gleichzeitigkeit ist.
d) Recherchieren Sie den experimentellen Nachweis von Myonen (Stichwort: Szintillationsdetektor), und fassen Sie Ihre Ergebnisse zusammen. Diskutieren Sie in der Gruppe darüber, wie glaubhaft Sie Einsteins Theorien finden würden, wenn diese nicht experimentell nachweisbar wären.

Quantitative Betrachtung

Weil das Photon aus Brunos Sicht eine längere Strecke zurücklegen muss als aus Kims Sicht, braucht das Photon aus Brunos Sicht länger als aus Kims Sicht. Dieser als Zeitdilatation bezeichnete Effekt wird von Gruppe 1 genauer untersucht und Ihnen später präsentiert. Wir wollen die entsprechende Gleichung aber weiter unten für unsere Betrachtungen schon nutzen: $\frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

Aus Kims Sicht sind die zurückgelegten Strecken für Hin- und Rückweg des Photons identisch. Aus Brunos Sicht macht es allerdings einen Unterschied, ob sich das Photon in Bewegungsrichtung des Zugs bewegt oder entgegengesetzt. Auf dem „Hinweg" entfernt sich das Ende des Abteils vom Photon und die zurückzulegende Strecke verlängert sich um $v\Delta t_1$, wobei Δt_1 die Zeitdauer für den Hinweg ist. Das Photon legt dann die Strecke $L + v\Delta t_1 = c\Delta t_1$ zurück, wobei L die Länge des Abteils aus Brunos Sicht ist. Analog gilt für den „Rückweg": $L - v\Delta t_2 = c\Delta t_2$. Wir stellen beide Gleichungen nach der Zeit um und erhalten dann $\Delta t_1 = \frac{L}{c-v}$ bzw.



$\Delta t_2 = \frac{L}{c+v}$ und insgesamt: $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2Lc}{c^2-v^2}$

Das ist also die Zeit, die Bruno für den Hin- und Rückweg des Photons misst. Kim dagegen hat die Zeit $\Delta t_0 = \frac{2L_0}{c}$ gemessen (vgl. Vorseite). Nun können wir die oben erwähnte Beziehung für die Zeitdilatation nutzen und erhalten damit die Längenkontraktion:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \frac{\frac{2Lc}{c^2-v^2}}{\frac{2L_0}{c}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow L = L_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}.$$

Grenzen der klassischen Mechanik

Bei Längenberechnungen haben Sie bisher nie die Längenkontraktion berücksichtigt. Waren die bisherigen Ergebnisse also alle falsch? Um das beurteilen zu können, betrachten wir ein einfaches Beispiel: Ein Auto, das sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 30\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ fortbewegt. Die Geschwindigkeit taucht in Einsteins Formel nur im Bruch $\frac{v^2}{c^2}$ auf. Im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit ($c \approx 300\,000\,000\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$) ist der Nenner des Bruchs sehr viel größer als der Zähler, wodurch der Bruch sehr klein wird:

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{(30\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{(300\,000\,000\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} = 0{,}00000000000001 = 1 \cdot 10^{-14}$$

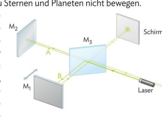
Dadurch wird die Wurzel in $L = L_0 \cdot \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ in guter Näherung zu 1 und am Ende erhalten wir: $L \approx L_0$. Für solche Geschwindigkeiten, wie wir sie im Alltag kennen, können wir den Effekt der Längenkontraktion also vernachlässigen. In diesen Fällen ist es sinnvoll, „klassisch" zu rechnen, um so die Rechnungen zu vereinfachen.

e) Vollziehen Sie die quantitative Betrachtung der Längenkontraktion nach, indem Sie die Rechnung selbstständig durchführen. Nutzen Sie auch weitere, selbst recherchierte Quellen und vergleichen Sie diese mit dem nebenstehenden Text.
f) Bestätigen Sie rechnerisch, dass die Myonen in ihrem System 1,09 km zur Erde zurücklegen.
g) Vollziehen Sie das Beispiel zu den Grenzen der klassischen Mechanik nach. Berechnen Sie dafür, wie groß L bei einem Vorgang wäre, der im Auto in Ruhe ist.
h) In der Wissenschaft gilt die Faustregel, dass ab Geschwindigkeiten von $\approx 10\ \%$ der Lichtgeschwindigkeit die relativistischen Effekte berücksichtigt werden sollten. Bestimmen Sie für diesen Fall die Abweichung, die durch die Längenkontraktion hervorgerufen wird.
i) Erstellen Sie eine Präsentation (vgl. Methode S. 100/101), bei der Sie alle Ihre gesammelten Ergebnisse anschaulich zusammenfassen. Nutzen Sie dafür auch die Simulation sowie eventuell hilfreiche Materialien aus Ihrer Recherche, wie z. B. Erklärvideos (Quellen angeben, vgl. Methode S. 100). Verfassen Sie auch eigenständig einen Merkkasten mit den wichtigsten Erkenntnissen.

M1 Das Michelson-Morley-Interferometer – Äthertheorie

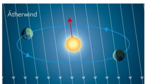


Dass Licht ähnliche Eigenschaften hat, wie zum Beispiel Schall- oder Wasserwellen, wusste man bereits im 19. Jahrhundert. Man konnte sich allerdings nicht erklären, wie sich das Licht fortbewegen kann. Während die Schall- bzw. Wasserwellen ein Medium benötigen (Luft bzw. Wasser), kann sich das Licht durch das Vakuum des Weltraums von der Sonne zur Erde bewegen. Eine lange Zeit angesehene Theorie, die diesen Umstand erklären sollte, war die des Äthers: Eine unsichtbare Substanz, die das Universum durchsetzt und dem Licht als Ausbreitungsmedium dient. Der Äther soll laut der Theorie ruhend sein, sich also in Relation zu Sternen und Planeten nicht bewegen.



Am Ende des 19. Jahrhunderts hat der Physiker Albert Michelson (sowie etwas später auch der Chemiker Edward Morley) ein Experiment entwickelt, mit dem dieser „Lichtäther“ nachgewiesen werden sollte: Das Michelson-Interferometer. Aus einer Lichtquelle wird Licht auf einen halbdurchlässigen Spiegel gestrahlt. Ein Teil des Lichts durchdringt den Spiegel, ein anderer Teil wird senkrecht dazu abgelenkt (vgl. Zeichnung).

Das Experiment war so angelegt, dass das Licht wieder reflektiert wird und am Ende beide Pfade wieder zusammengeführt werden. Sind beide Strecken (A und B) gleich lang, müssten am Ende beide Lichtbündel gleichzeitig im Detektor ankommen – wenn sich das Interferometer im Äther nicht bewegt. Die Erde selbst ist aber kein ruhendes System, sondern bewegt sich, der Theorie nach, im Äther auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne. Strahlt man das Licht nun in Bewegungsrichtung der Erde, müsste es eine Art „Ätherwind“ spüren, ähnlich wie bei einem Flugzeug, das sich relativ zur ruhenden Luft bewegt. Anders g esagt: Im Ruhesystem der Erde betrachtet, bewegt sich der Äther auf die Erde zu, das Licht wird also „ausgebremst“. Bewegt sich das Licht im Experiment dagegen senkrecht zur Bewegungsrichtung der Erde, dürfte es keinen Ätherwind spüren, da in diese Richtung betrachtet der Äther ruht.



Arbeitsauftrag

a) Recherchieren Sie nach einer Simulation oder einer Animation, die den Weg des Lichts im Interferometer gut veranschaulicht (Beispiel: siehe Mediencode). Machen Sie sich damit vertraut und vollziehen Sie die laut Äthertheorie unterschiedlich langen Strecken der beiden Laufrichtungen nach.

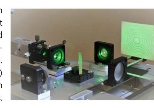



MC 67051-40

b) Vollziehen Sie das Beispiel des Schwimmers auf S. 127 nach, indem Sie die Rechnung im Heft ausführen. Übertragen Sie das Beispiel auf das Michelson-Interferometer und verdeutlichen Sie anhand von Skizzen die unterschiedlich langen Strecken der beiden Photonen.

c) Recherchieren Sie nach weiteren Materialien wie Fachtexten, Erklärvideos etc. zu dem Experiment und vergleichen Sie diese mit dem nebenstehenden Text.
Stellen Sie die aus Ihrer Sicht nützlichsten Materialien zusammen und begründen Sie Ihre Auswahl. Beschreiben Sie mit eigenen Worten, wie das Experiment die Äthertheorie bestätigen sollte. Erklären Sie dabei insbesondere, was unter dem „Ätherwind“ zu verstehen ist.

Das aus damaliger Sicht überraschende Ergebnis: Beide Lichtbündel kamen immer exakt gleichzeitig an und wurden nicht vom „Ätherwind" beeinflusst, egal, wie man das Interferometer auch ausrichtete. Dadurch konnte die Äthertheorie widerlegt werden, was wenige Jahre später durch Albert Einsteins Theorie dann auch erklärt werden konnte. Licht (und alle anderen Arten elektromagnetischer Wellen) wird nicht durch einen Ätherwind beeinflusst, sondern bewegt sich immer mit Lichtgeschwindigkeit. Und im Gegensatz zur „klassischen" Mechanik (z. B. Wasser- oder Schallwellen) breitet sich das Licht auch ganz ohne ein Medium aus.



Analogierechnung: Ein Schwimmer im Fluss

Die Vorhersagen der Äthertheorie, die durch das Experiment nachgewiesen werden sollten, wirken auf den ersten Blick nicht sonderlich intuitiv: Warum sollte der Lichtäther in Form des Ätherwindes einen Einfluss haben, wenn die Photonen sich einmal in Bewegungsrichtung der Erde bewegen und einmal entgegengesetzt? Sollte sich das nicht ausgleichen? Anhand einer Analogierechnung lässt sich das aber besser nachvollziehen:



Ein Schwimmer schwimmt mit einer Geschwindigkeit von $2{,}5\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ in einem ruhenden Gewässer eine Strecke von 100 m. Er benötigt dafür also 40 s. Nun steigt er in einen Fluss, der eine Fließgeschwindigkeit von $0{,}5\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ hat. Bewegt sich der Schwimmer mit dem Strom, hätte er also insgesamt eine Geschwindigkeit von $3{,}0\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$; schwimmt er gegen den Strom, wären es $2{,}0\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Schwimmt er nun 50 m gegen den Strom und 50 m mit dem Strom, benötigt er für die 100 m lange Gesamtstrecke jedoch keine 40 s, sondern ≈ 42 s, wie sich leicht nachvollziehen lässt. Die entgegengesetzten Bewegungen gleichen sich also nicht aus und im ruhenden Gewässer würde der Schwimmer schneller vorankommen, als wenn er einmal mit und einmal gegen den Strom schwimmt. Genau so ist es mit dem Äther in der Theorie: Die Photonen in senkrechter Richtung müssten etwas schneller sein als in paralleler Richtung, wenn Sie vom Ätherwind gebremst oder beschleunigt werden. Wenn allerdings kein Äther existiert, entspricht die Situation der eines ruhenden Gewässers: Es spielt keine Rolle, in welche Richtung sich die Photonen fortbewegen.

e) Recherchieren Sie die Entstehung und Entwicklung der Äthertheorie und fassen Sie Ihre Ergebnisse übersichtlich zusammen. Diskutieren Sie darüber, ob eine für sich gesehen schlüssige Theorie eines experimentellen Nachweises bedarf.

f) Stellen Sie eine Kausalkette (vgl. Methode S. 119) auf, die zeigt, wie sich anhand der Einsteinschen Postulate die Äthertheorie widerlegen lässt. Identifizieren Sie dabei den „Denkfehler", der in der Theorie zu den unterschiedlich langen Strecken der Photonen geführt hat.

g) Beschreiben Sie, inwiefern das Michelson-Morley-Experiment nachweist, dass das Verständnis der „klassischen" Mechanik zu dem Zeitpunkt unvollständig war und inwiefern Einsteins Postulate dieses Verständnis erweitern.

h) Erstellen Sie eine Präsentation (vgl. Methode S. 100/101), bei der Sie alle Ihre gesammelten Ergebnisse anschaulich zusammenfassen. Nutzen Sie dafür auch die Animationen sowie eventuell hilfreiche Materialien aus Ihrer Recherche, wie z. B. Erklärvideos (Quellen angeben, vgl. Methode S. 100). Verfassen Sie auch eigenständig einen Merkkasten mit den wichtigsten Erkenntnissen.

8.5 Versuche und Materialien zum Gruppenthema 4

Die beiden Texte dieses Kapitels stammen aus den 1930er Jahren und behandeln die „Deutsche Physik“. Dabei handelt es sich um eine durch den Nationalsozialismus geprägte, antisemitische Lehre. Sie lehnt insbesondere die auch von Albert Einstein geprägte moderne Physik nicht aus wissenschaftlichen, sondern aus antisemitischen Gründen ab. Bei M1 handelt es sich um ein Vorwort aus einer Veröffentlichung des deutschen Nobelpreisträgers Philipp Lenard, bei M2 um einen Text aus der Zeitung „Das Schwarze Korps“, die im Nationalsozialismus als Kampfblatt der SS galt.

M1 Vorwort von Philipp Lenard aus seiner Veröffentlichung „Deutsche Physik“

„Deutsche Physik?“ wird man fragen. […] „Die Wissenschaft ist und bleibt international!“ wird man mir einwenden wollen. Dem liegt aber immer ein Irrtum zugrunde. In Wirklichkeit ist die Wissenschaft, wie alles was Menschen hervorbringen, rassisch, blutmäßig bedingt. Ein Anschein von Internationalität kann entstehen, wenn aus der Allgemeingültigkeit der Ergebnisse der Naturwissenschaft zu Unrecht auf allgemeinen Ursprung geschlossen wird oder wenn übersehen wird, dass die Völker verschiedener Länder, die Wissenschaft gleicher oder verwandter Art geliefert haben wie das deutsche Volk, dies nur deshalb und insofern konnten, weil sie ebenfalls vorwiegend nordischer Rassenmischung sind oder waren. Völker anderer Rassenmischung haben eine andere Art, Wissenschaft zu treiben. […]

Man könnte anhand der vorliegenden Literatur vielleicht bereits von einer Physik der Japaner reden; in der Vergangenheit gab es eine Physik der Araber. Von einer Physik der Neger ist noch nichts bekannt; dagegen hat sich sehr breit eine eigentümliche Physik der Juden entwickelt. […] Juden sind überall, und wer heute noch die Behauptung von der Internationalität der Naturwissenschaft verficht, der meint wohl unbewusst die jüdische, die allerdings mit den Juden überall und überall gleich ist. […]

[Die jüdische Physik] hat dann alsbald auch unter vielen Forschern nichtjüdischen oder doch nicht rein jüdischen Blutes eifrige Vertreter gefunden. Um sie kurz zu charakterisieren, kann am gerechtesten und besten an die Tätigkeit ihres wohl hervorragendsten Vertreters, des wohl reinblütigen Juden A. Einstein, erinnert werden. Seine „Relativitäts-Theorien“ wollten die ganze Physik umgestalten und beherrschen; gegenüber der Wirklichkeit haben sie aber nun schon vollständig ausgespielt (Es ist selbstverständlich, dass das vorliegende Werk nirgends auf dieses verfehlte Gedankengebäude einzugehen hat). […]

Die großen arischen Forscher scheuten sich, mit Unsicherem hervorzutreten; sie wendeten sich vielmehr still vor allem dazu, ihre neuen Gedanken an der Wirklichkeit zu prüfen, um nicht Vermutungen, sondern erkannte Tatsachen zu bringen. […] In der jüdischen Physik wird schon jede Vermutung, die nachher nicht ganz verfehlt sich zeigt, als Markstein gewertet. […]

Die jüdische „Physik“ ist somit nur ein Trugbild und eine Entartungserscheinung der grundlegenden arischen Physik. […]

Quelle: Philipp Lenard (1936), Deutsche Physik in vier Bänden, J. F. Lehmanns Verlag

Deutsche Physik
in vier Bänden
Von
Philipp Lenard
Dritter Band:
Optik, Elektrostatik und Anfänge der Elektrodynamik
Dritte, vermehrte Auflage
J. F. Lehmanns Verlag / München-Berlin 1943

Arbeitsauftrag

a) Ordnen Sie den Text in den Kontext der 1930er Jahre ein.
b) Suchen Sie nach weiteren Informationen zur „Deutschen Physik“ und fassen Sie kurz zusammen, was man aus heutiger Sicht darunter versteht.
c) Recherchieren Sie den Werdegang von Philipp Lenard, insbesondere seine Einstellung zur „Deutschen Physik“. Identifizieren Sie Passagen aus dem links stehenden Text, die diese Einstellung widerspiegeln.
d) Fassen Sie Ihre Ergebnisse aus a)-c) zusammen und präsentieren Sie diese in der Klasse.
e) Diskutieren Sie mit der Gruppe, die M2 bearbeitet hat, inwiefern gesellschaftliche oder politische Entwicklungen die Akzeptanz von Forschungsergebnissen beeinflussen. Nutzen Sie dafür ein aktuelles Beispiel wie den Klimawandel.

M2 „Weiße Juden" in der Wissenschaft

Es wird leider so sein, dass wir nach der idealen Lösung einer jüdischen Auswanderung immer noch gegen jüdische Einflüsse ankämpfen werden müssen [...]. Denn es ist leider so, dass die furchtbare Gefahr der Bejudung unseres öffentlichen Lebens und die Macht des jüdischen Einflusses, die der Nationalismus dämmen musste, nicht allein von dem zahlenmäßig schwachen Judentum getragen wurde, sondern in nicht geringerem Maße auch von solchen Menschen arischen Geblüts, die sich für den jüdischen Geist empfänglich zeigten und ihm hörig wurden. [...]

Der Volksmund hat für solche Bazillenträger die Bezeichnung „Weißer Jude" geprägt, die überaus treffend ist, weil sie den Begriff des Juden über das Rassische hinaus erweitert. [...]

Es gibt vor allem ein Gebiet, wo uns der jüdische Geist der „Weißen Juden" in Reinkultur entgegentritt und wo die geistige Verbundenheit der „Weißen Juden" mit jüdischen Vorbildern und Lehrmeistern stets einwandfrei nachzuweisen ist: die Wissenschaft. [...]

Werner Heisenberg

Am klarsten erkennbar ist der jüdische Geist wohl im Bereich der Physik, wo er in Einstein seinen „bedeutendsten" Vertreter hervorgebracht hat. Während alle großen naturwissenschaftlichen Entdeckungen und Erkenntnisse auf die besonderen Fähigkeiten germanischer Forscher zur geduldigen, fleißigen und aufbauenden Naturbeobachtung zurückzuführen sind [...], hat der in den letzten Jahrzehnten vordringende jüdische Geist die dogmatisch verkündete, von der Wirklichkeit losgelöste Theorie in den Vordergrund zu schieben gewusst. [...]

Wie sicher sich die „Weißen Juden" in ihren Stellungen fühlen, beweist das Vorgehen des Professors für theoretische Physik in Leipzig, Professors Werner Heisenberg, der es 1936 zuwege brachte, in ein parteiamtliches Organ einen Aufsatz einzuschmuggeln, worin er Einsteins Relativitätstheorie als „die selbstverständliche Grundlage weiterer Forschung" erklärte und „eine der vornehmsten Aufgaben der deutschen wissenschaftlichen Jugend in der Weiterentwicklung der theoretischen Begriffssysteme" sah. [...]

1933 erhielt Heisenberg den Nobelpreis zugleich mit den Einstein-Jüngern Schrödinger und Dirac – eine Demonstration des jüdisch beeinflussten Nobelkomitees gegen das nationalsozialistische Deutschland, die der „Auszeichnung" Ossietzkys gleichzusetzen ist. Heisenberg stattete seinen Dank ab, indem er sich im August 1934 weigerte, einen Aufruf der deutschen Nobelpreisträger für den Führer und Reichskanzler zu unterzeichnen. Seine Antwort lautet damals: „Obwohl ich persönlich „ja" stimmte, scheint mir politische Kundgebung von Wissenschaftlern unrichtig, da auch früher niemals üblich. Unterzeichne daher nicht." [...]

Quelle: Johannes Stark (1937), „Weiße Juden" in der Wissenschaft

Arbeitsauftrag

a) Ordnen Sie den Text in den Kontext der 1930er Jahre ein.

b) Suchen Sie nach weiteren Informationen zur „Deutschen Physik" und fassen Sie zusammen, was man aus heutiger Sicht darunter versteht. Ergänzen Sie Ihre Belege mit Informationen aus dem Text links.

c) Recherchieren Sie den Werdegang von Werner Heisenberg, insbesondere seiner Einstellung zur „Deutschen Physik". Auch der Mediencode MC 67051-41 kann dabei hilfreich sein. Diskutieren Sie in der Gruppe darüber, inwiefern seine Unterstützung von Einsteins Relativitätstheorie politische Gründe hatte oder eher auf wissenschaftlicher Basis geschah.

d) Fassen Sie Ihre Ergebnisse aus a)-c) zusammen und präsentieren diese in der Klasse.

e) Diskutieren Sie mit der Gruppe, die M1 bearbeitet hat, darüber, inwiefern gesellschaftliche oder politische Entwicklungen die Akzeptanz von Forschungsergebnissen beeinflussen. Nutzen Sie dafür ein aktuelles Beispiel wie den Klimawandel.



Selbsttest-Checkliste

- ✓ Bearbeiten Sie die Aufgaben schriftlich in ordentlicher Form. Die Auswertungstabelle zeigt die Kompetenzerwartungen und Hilfestellungen.
- ✓ Vergleichen Sie Ihre Lösungen mit den Lösungsskizzen auf Seite 204-206.
- ✓ Bewerten Sie nun Ihre Lösungen selbst mit den Symbolen ☺, 😐 oder ☹.

1 a) Erklären Sie, was man unter einem Inertialsystem versteht. Nennen Sie je ein Beispiel für ein Inertialsystem und für ein Bezugssystem, das kein Inertialsystem ist. Geben Sie kurz den Grund dafür an, dass Ihr gewähltes Beispiel kein Inertialsystem ist.
b) Nennen und erläutern Sie die Einsteinschen Postulate.

2 Bruno steht am Bahnsteig, während Kim sich genau in der Mitte eines Zugs befindet, der mit konstanter Geschwindigkeit an Bruno vorbeifährt. An beiden Enden des Zugs befindet sich eine Uhr, die dann gestartet wird, wenn sie von einem Lichtimpuls getroffen wird. Kim aktiviert den Lichtimpuls genau dann, wenn sie an Bruno vorbeifährt.
Beschreiben Sie anhand dieser Situation ein Gedankenexperiment, das die Relativität der Gleichzeitigkeit verdeutlicht.

3 a) Erklären Sie den Begriff „Zeitdilatation“, indem Sie ein Gedankenexperiment beschreiben und erklären, bei dem die Zeitdilatation sichtbar wird.
b) Erklären Sie den Begriff „Längenkontraktion“, indem Sie ein Gedankenexperiment beschreiben, das ohne die Längenkontraktion zu einem Widerspruch führt.

4 a) Beschreiben Sie, was die Kernaussagen der Äthertheorie sind. Erklären Sie dann, wie das Michelson-Morley-Experiment diese Theorie bestätigen sollte.
b) Beschreiben Sie, inwiefern das Michelson-Morley-Experiment nachweist, dass das Verständnis der „klassischen“ Mechanik zu dem Zeitpunkt unvollständig war und inwiefern Einsteins Postulate dieses Verständnis erweitern.

5 Erklären Sie den Begriff „Deutsche Physik“ und erläutern Sie an diesem Beispiel, wie sich gesellschaftliche und politische Entwicklungen auf die Wahrnehmung und Akzeptanz physikalischer Erkenntnisse auswirken.

Auswertungstabelle

	Ich kann...	Hilfe
1	den Begriff „Inertialsystem“ erklären und kenne die Einsteinschen Postulate.	S. 120/ 121
2	erklären, dass ein Ereignis, das in einem Inertialsystem gleichzeitig stattfindet, in einem anderen Inertialsystem nicht gleichzeitig stattfinden muss.	S. 120/ 121
3	die Begriffe Zeitdilatation und Längenkontraktion anhand von Gedankenexperimenten erklären.	S. 122ff
4	die Äthertheorie und die Bedeutung des Michelson-Morley-Experiments beschreiben.	S. 126ff
5	am Beispiel der „Deutschen Physik“ erläutern, welchen Einfluss gesellschaftliche und politische Entwicklungen auf die Wissenschaft haben können.	S. 128ff

Einsteinsche Postulate

1. Postulat: Die physikalischen Gesetze sind in jedem Inertialsystem gleich.
2. Postulat: Die Lichtgeschwindigkeit ist in jedem Inertialsystem gleich groß.

Eine Schlussfolgerung aus den Postulaten ist, dass zwei innerhalb eines Inertialsystems gleichzeitig stattfindende Ereignisse nicht in allen Inertialsystemen gleichzeitig stattfinden.

Ein Inertialsystem ist ein nichtbeschleunigtes Bezugssystem. Der Trägheitssatz ist in jedem Inertialsystem erfüllt.

Zeitdilatation

Die Zeit vergeht in einem bewegten Bezugssystem aus Sicht eines ruhenden Beobachters langsamer als im Ruhesystem des Beobachters. Zwischen der Zeit Δt im ruhenden und Δt_0 im bewegten System besteht folgender Zusammenhang:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

„Bewegte Uhren gehen langsamer."
v: Geschwindigkeit des bewegten Systems
c: Lichtgeschwindigkeit

Längenkontraktion

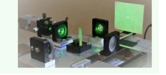
Wenn ein bewegtes Objekt aus Sicht eines ruhenden Beobachters die Strecke L_0 zurückgelegt hat, so wurde aus Sicht des bewegten Objekts nur die verkürzte Strecke L zurückgelegt:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

„Für bewegte Beobachter sind Strecken verkürzt."
v: Geschwindigkeit des bewegten Systems
c: Lichtgeschwindigkeit

Äthertheorie

Die Äthertheorie besagt, dass das Universum von einer unsichtbaren, ruhenden Substanz durchdrungen ist, die dem Licht als Ausbreitungsmedium dient. Im Michelson-Morley-Experiment konnte entgegen der Erwartungen diese These nicht bestätigt werden, Licht breitet sich also ohne Medium aus.



Deutsche Physik

Die Deutsche Physik ist eine durch den Nationalsozialismus geprägte, antisemitische Lehre. In ihr wird die Physik nicht aus rein wissenschaftlichen, sondern eben aus antisemitischen Gründen bewertet.

Philipp Lenard gilt als einer der Begründer der Lehre, während u. a. Werner Heisenberg sich ihr entgegengestellt hat.

9 Energieversorgung

Fahrplan für dieses Kapitel

Überblick

In diesem EVA-Kapitel erarbeiten Sie sich die physikalischen Grundlagen der heutigen Energieversorgung. Gerade vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen und weltweiter klimatischer Veränderungen ist es wichtig, hier fundiertes Sach- und Handlungswissen zu besitzen.
Der Fahrplan für dieses Kapitel sieht etwas anders aus als für die beiden vorangegangenen EVA-Kapitel. Sie teilen sich zwar auch hier anfangs in Gruppen ein, entsprechend der sechs unten vorgestellten Themen. Anschließend werden Sie aber zusammen mit Ihrer Gruppe alle Unterkapitel bearbeiten, immer mit dem jeweiligen Gruppenthema im Hinterkopf. Die Kapitel 9.1 und 9.2 dienen ein wenig als Vorbereitung, in Kapitel 9.3 wird dann Ihr gewähltes Gruppenthema im Vordergrund stehen und Kapitel 9.4 dient der Frage, welche Konsequenzen Sie abschließend daraus für sich selbst ziehen.
Anfangs werden Ihnen viele Hilfen angeboten, wohingegen im Kapitel 9.3 mehr Eigenleistung erforderlich ist und dieses entsprechend mehr Zeit in Anspruch nimmt. Insgesamt erwartet Sie der dargestellte Ablauf. Die Zeitangaben sollen Ihnen als Orientierung dienen, damit Sie die Gruppenarbeit besser strukturieren können.

Vorbereitende Lernaufgabe	**Kap. 9.1**	**Kap. 9.2**	**Kap. 9.3**	**Kap. 9.4**
Steckbrief zum Gas (1 Stunde)	Reversible und irreversible Vorgänge (1 Stunde)	Wirkungsgrade von Kraftwerken (1 Stunde)	Zentrale Fragen der Energieversorgung (2 Stunden)	Energieeinsparvertrag und Ausblick (2 Stunden)

Gemeinsame Recherche – Steckbrief zum Energieträger Gas

In Kapitel 9.3 werden Sie mit Ihrer jeweiligen Gruppe einen Steckbrief zu einem Thema der Energieversorgung verfassen. Folgende sechs Gruppenthemen stehen zur Verfügung:

① Kraftwerke mit fossilen Energieträgern
② Kraftwerke mit erneuerbaren Energieträgern
③ Kraftwerke, die Kernenergie nutzen (Fusions- / Fissionsreaktoren)
④ Möglichkeiten des Energietransports
⑤ Energiespeicherung
⑥ Informationen zum Ausbau der Energienetze

Suchen Sie sich eines der sechs Themen aus und finden Sie sich in Ihrer jeweiligen Gruppe zusammen (vgl. Methode S. 99). Die Methode auf der nächsten Seite erklärt das genaue Vorgehen, um am Ende der Gruppenarbeit den Steckbrief zu erstellen. Mit der Aufgabe darunter können Sie dieses Vorgehen anhand des Energieträgers „Gas" einüben und wissen so bereits, was von Ihnen bei der Gruppenarbeit am Ende erwartet wird.

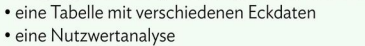
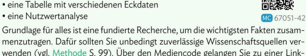
Beispiele für fossile Energieträger:
- Gas
- Öl
- Kohle
- Torf

Beispiele für erneuerbare Energieträger:
- Wind
- Sonne
- Wasser
- Geothermie
- Biomasse
- Umweltwärme

Methode

Erstellen von Steckbriefen

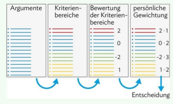
Am Ende des Kapitels sollen Sie einen Steckbrief zu Ihrem jeweiligen Gruppenthema erstellen. Der Steckbrief sollte folgende Elemente enthalten:
- ein geeignetes Energieflussdiagramm (nur die Gruppen ① - ③)
- eine Tabelle mit verschiedenen Eckdaten
- eine Nutzwertanalyse

MC 67051-42

Grundlage für alles ist eine fundierte Recherche, um die wichtigsten Fakten zusammenzutragen. Dafür sollten Sie unbedingt zuverlässige Wissenschaftsquellen verwenden (vgl. Methode S. 99). Über den Mediencode gelangen Sie zu einer Linksammlung zum Thema „Energieversorgung", die geeignete Quellen für die Recherche enthält.

Die Tabelle mit den Eckdaten zum Thema „Energieträger" sollte folgende Informationen enthalten:
- Durchschnittsleistung
- Wirkungsgrad
- Bau- und Betriebskosten
- Verfügbarkeit und Transport
- Möglichkeit nachhaltiger Nutzung
- Emissionen/Abfall
- Negative Folgen für die Umwelt
- Zukünftiges Potential



Die Nutzwertanalyse (NWA) kennen Sie bereits aus den vergangenen Jahren und kann auf S. 223 nochmal nachgelesen werden. Bei der Erstellung der NWA im Rahmen der Steckbriefe können Sie zuerst einmal alle Kriterien gleichwertig gewichten, d. h. Sie addieren alle ermittelten Zahlenwerte und tragen diese Summe ein. Als Bewertung wird eine Abstufung mit den Punkten von -2 bis 2 vorgenommen, also 2 / 1 / 0 / -1 / -2. Die Skala geht also von „2" für „Kriterium bestens erfüllt" bis „-2" für „Kriterium überhaupt nicht erfüllt".

Anschließend kann bei Bedarf noch eine persönliche Gewichtung vorgenommen werden, um die Bewertung stärker zu personalisieren. Hierbei können Sie beispielsweise die Punkte für eine bestimmte Kategorie mit dem Faktor 2 multiplizieren, wenn Ihnen diese Kategorie besonders wichtig ist.

Arbeitsaufträge

1 \ Erstellen Sie einen Steckbrief zum Energieträger „Gas". Über den Mediencode gelangen Sie zu einem vorgefertigten Arbeitsblatt, das Sie dafür nutzen können. Die Bewertung und persönliche Gewichtung bei der NWA sollten Sie zu diesem Zeitpunkt noch weglassen und erst nach Bearbeitung des restlichen Kapitels ausfüllen. Hinweis: Teilen Sie sich die Recherche der Informationen für die Tabelle auf. Insbesondere folgende im obigen Mediencode hinterlegten Quellen sind für Sie nützlich: [3], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [15]. Belegen Sie Ihre Quellen durch Angabe der entsprechenden Links/Literatur (vgl. Methode S. 100).



MC 67051-43

9.1 Reversible und irreversible Vorgänge



Physikalische Prozesse lassen sich in zwei Klassen einteilen. Wenn die Prozessrealisierung zeitlich umkehrbar ist, nennt man diesen Prozess reversibel. Kann der Prozess hingegen nur in einer Richtung stattfinden, nennt man den Prozess irreversibel. Rückwärts abgespielte Filme sehen deshalb merkwürdig aus. So ist es beispielsweise höchst unwahrscheinlich, dass sich aus einem zersprungenen Glas die einzelnen Glassplitter wieder von selbst zum intakten Glas zusammensetzen.

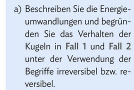
Im Folgenden erarbeiten Sie sich anhand eines selbstgewählten Beispiels den Unterschied zwischen reversiblen und irreversiblen Vorgängen. Sie können zwischen M1, M2 oder der über den Mediencode verlinkten Quelle wählen. Finden Sie sich wieder in Ihrer anfangs gebildeten Gruppe zusammen und verdeutlichen Sie anhand des gewählten Beispiels, dass irreversible Vorgänge mit einem Energieverlust verbunden sind.



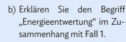
MC 67051-44

M1 Hüpfen einer Kugel – inelastisch und elastisch

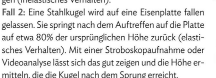
Der Unterschied zwischen elastischen und inelastischen Prozessen lässt sich gut anhand von zwei einfachen Versuchen veranschaulichen.



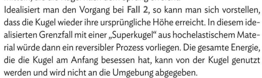
Fall 1: Eine Knetkugel wird aus einer Höhe von 1 m auf den Boden fallen gelassen. Sie verformt sich und bleibt am Boden liegen, ohne vorher nochmal hochzuspringen (inelastisches Verhalten).



Fall 2: Eine Stahlkugel wird auf eine Eisenplatte fallen gelassen. Sie springt nach dem Auftreffen auf die Platte auf etwa 80% der ursprünglichen Höhe zurück (elastisches Verhalten). Mit einer Stroboskopaufnahme oder Videoanalyse lässt sich das gut zeigen und die Höhe ermitteln, die die Kugel nach dem Sprung erreicht.



Idealisiert man den Vorgang bei **Fall 2**, so kann man sich vorstellen, dass die Kugel wieder ihre ursprüngliche Höhe erreicht. In diesem idealisierten Grenzfall mit einer „Superkugel“ aus hochelastischem Material würde dann ein reversibler Prozess vorliegen. Die gesamte Energie, die die Kugel am Anfang besessen hat, kann von der Kugel genutzt werden und wird nicht an die Umgebung abgegeben.



Irreversible Prozesse laufen mit einer *Energieentwertung* einher. So hat sich in **Fall 1** oben durch die Verformung der Kugel die anfangs vorhandene potentielle Energie (= Höhenenergie) in innere Energie umgewandelt. Die innere Energie wandelt sich aber nicht von selbst wieder in Höhenenergie zurück, sie hat für die Umkehrung des Prozesses einen geringeren „Wert“ und kann nicht genutzt werden, obwohl sie dem System grundsätzlich zur Verfügung steht. In der idealisierten Form von **Fall 2** hingegen kann die mechanische Energie, hier die potentielle Energie, wieder vollständig zurückgewonnen werden.

Reversible und irreversible Prozesse lassen sich also aus energetischer Sicht dadurch unterscheiden, ob eine Energieentwertung stattgefunden hat oder nicht.

Arbeitsauftrag

a) Beschreiben Sie die Energieumwandlungen und begründen Sie das Verhalten der Kugeln in **Fall 1** und **Fall 2** unter der Verwendung der Begriffe irreversibel bzw. reversibel.

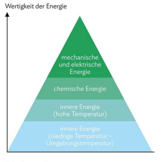
b) Erklären Sie den Begriff „Energieentwertung“ im Zusammenhang mit **Fall 1**.

c) Wenn ein irreversibler Vorgang auch in umgekehrter Richtung stattfinden würde (und so wieder zu einem reversiblen Vorgang wird), würde das nicht den Energieerhaltungssatz verletzen. Dennoch existieren in der Praxis viel mehr irreversible als reversible Prozesse. Erklären Sie das anhand der folgenden, fiktiven Situation: *Bei einem auf dem Boden liegenden, ruhenden Stein bewegen sich plötzlich alle Atome in dieselbe Richtung, wodurch der Stein hochspringt.*

M2 Erhitzen von Flüssigkeiten

Energieentwertung

Wenn Sie eine heiße Tasse Tee oder einen Kaffee trinken, haben bereits ein paar Energieumwandlungen stattgefunden, die dazu geführt haben, dass das Getränk auf eine für Sie angenehme Temperatur erhitzt wurde. Der Wasserkocher oder die Kaffeemaschine haben die elektrische Energie, die aus der Steckdose bezogen wurde, in innere Energie umgewandelt und so das Wasser erhitzt. Die Flüssigkeit behält diese Energie aber nicht, sondern überträgt sie im Wasserdampf und in Form von Wärmestrahlung an die Umgebung und kühlt sich so lange weiter ab, bis sie die Umgebungstemperatur angenommen hat. Der Prozess lässt sich praktisch nicht mehr rückgängig machen. Diese und jede andere Energieumwandlung läuft von alleine in nur eine Richtung ab – in Richtung innere Energie. Das sind also irreversible Prozesse, die mit einer Energieentwertung verbunden sind. Die Umkehrung der Prozesse ist nur durch einen hohen Einsatz weiterer Energie von außen möglich. Ein Vergleich: Der Gebrauch von frischem Wasser im Haushalt verunreinigt das Wasser und mindert seinen Wert. Nur mit großem Aufwand lässt es sich wieder reinigen. Ähnlich dem Wasser im Haushalt kann man den Energieformen eine Wertigkeit zusprechen. Zwar bleibt der Betrag der Energie bei jeder Energieumwandlung erhalten, doch wird dabei ihr Wert gemindert. Die Wertigkeit der einzelnen Energieformen lässt sich in nebenstehender Energiepyramide darstellen.



Ein reversibler Prozess?

Es gibt aber Prozesse, bei denen die Energie der sich abkühlenden Flüssigkeit weiter genutzt wird. Beispielsweise basieren die meisten Kraftwerke darauf, dass mithilfe von Wasserdampf Turbinen angetrieben werden und deren mechanische Energie dann letztlich über einen Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. Betrachten wir vor dem Hintergrund nochmal den Fall des sich abkühlenden Heißgetränks: Wir könnten, ähnlich wie beim Kraftwerk, eine kleine Turbine direkt über der Tasse anbringen. So würde die innere Energie des Wasserdampfes in mechanische Energie der rotierenden Turbine umgewandelt und könnte dann wiederum mithilfe eines Generators in elektrische Energie umgewandelt werden. Damit könnten wir wieder die Flüssigkeit in der Tasse erhitzen, es würde also keine Energieentwertung stattfinden und dadurch ein reversibler Prozess vorliegen. Oder?

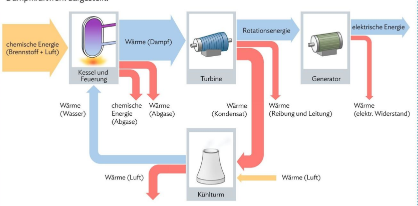
Arbeitsauftrag

a) Stellen Sie die im ersten Abschnitt links beschriebenen Energieumwandlungen in Form eines Energieflussdiagramms dar. Beschreiben Sie mithilfe der links dargestellten Energiepyramide die Entwertung, die bei allen Energieumwandlungen stattfindet.
b) Beschreiben Sie anhand von selbst gewählten Beispielen, inwiefern innere Energie im Allgemeinen schlechter für die Umkehr eines Prozesses genutzt werden kann als mechanische Energie.
c) Recherchieren Sie nach drei verschiedenen Beispielen für einen (nahezu) reversiblen Prozess.
d) Beurteilen Sie, inwiefern es sich bei dem fiktiven Beispiel mit der Turbine über der Teetasse um einen reversiblen Prozess handeln kann oder nicht. Überlegen Sie sich Bedingungen für die Umwandlungsprozesse, die den Vorgang zu einem reversiblen bzw. irreversiblen Prozess machen würden.
e) Recherchieren Sie nach einem Perpetuum mobile 1. und 2. Art. Ordnen sie den in Auftrag d) idealisierten Prozess der 1. bzw. 2. Art zu.
f) Wandeln Sie die Beispiele aus c) so ab, dass diese zu irreversiblen Prozessen werden.

Ziel dieses Unterkapitels ist es, dass Sie sich einen Überblick über die typischen Wirkungsgrade verschiedener Maschinen und Kraftwerkstypen verschaffen. Außerdem sollen Sie sich bewusst machen, welche physikalischen Chancen und Grenzen es für eine Optimierung von Wärmekraftwerken gibt.
Finden Sie sich wieder in Ihren Gruppen zusammen und bearbeiten Sie sowohl M1 als auch M2.

M1 Grundlagen für den Wirkungsgrad von Kraftwerken

Da in jedem Kraftwerk Energie aufgenommen und abgegeben wird, also umgewandelt wird, wirkt es als Energiewandler. Sie haben in Jgst. 9 bereits den Wirkungsgrad η kennengelernt: Er stellt das Verhältnis des Betrags der genutzten Energieformen ΔE_{nutz} zum Betrag der aufgewendeten Energieformen ΔE_{auf} dar:
$\eta = \frac{\Delta E_{\text{nutz}}}{\Delta E_{\text{auf}}}$.
Der Wirkungsgrad wird auch bei Energieflussdiagrammen verwendet. Hier ist ein solches für ein ganzes Dampfkraftwerk dargestellt.



Bei der Bildung des Wirkungsgrads für das gesamte Kraftwerk finden jedoch nicht alle Energieformen Verwendung: In den Zähler setzt man die Energieform ein, die man durch das Kraftwerk maximieren will. In den Nenner fügt man die zugeführte Energieform ein:

$$\text{Wirkungsgrad des Gesamtsystems Kraftwerk} = \frac{\text{vom Generator abgegebene elektrische Energie}}{\text{den Brennstoffen entnommene chemische Energie}}$$

Um beispielsweise eine elektrische Leistung von 0,6 kW zu erzeugen, muss bei einem Wirkungsgrad des Gesamtsystems *Kraftwerk* von 32 % eine Leistung von 1,9 kW in Form von chemischer Energie zugeführt werden, denn $\eta = \frac{0{,}6\ \text{kW}}{1{,}9\ \text{kW}} = 0{,}32$. Hierbei wurde verwendet, dass man statt des Quotienten der Energien auch den Quotienten der Leistungen bilden darf: $\eta = \frac{\Delta P_{\text{nutz}}}{\Delta P_{\text{auf}}}$. Diese Überlegungen gelten analog auch für andere Kraftwerkstypen, wie z. B. Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen, Kernkraftwerke und so weiter.

Arbeitsauftrag

Wiederholen Sie anhand des Texts den Begriff des Wirkungsgrads bei Maschinen und notieren Sie einen Merksatz dazu. Beginnen Sie wie folgt: *„Hat eine Maschine bzw. ein Kraftwerk die Aufgabe, Energie in einer bestimmten Energieform zu liefern, so definiert der Wirkungsgrad der Maschine, …“.*

M2 Wirkungsgrad von Wärmekraftwerken

Bei einem Wärmekraftwerk wird Wärme in elektrische Energie umgewandelt. Dabei wird zum Beispiel Wasser erhitzt und der so entstehende Wasserdampf zum Antreiben einer Turbine genutzt, deren mechanische Energie wiederum über einen Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. Die Wärme stammt dabei beispielsweise aus dem Verbrennen fossiler Energieträger (Kohle, Erdgas, Erdöl), aus dem Erdinnern (Erdwärme) oder auch solarthermischen Kraftwerken. Bei Letzteren wird Sonnenlicht gebündelt und damit dann das Wasser erhitzt.
Wie bei allen Kraftwerkstypen ist es in der Praxis nicht möglich, die gesamte zur Verfügung stehende Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Es wird beispielsweise ein gewisser Teil der Energie in Form von innerer Energie an die Umgebung abgegeben und kann dadurch nicht zum Erhitzen des Wassers genutzt werden. Es hat dann also eine Energieentwertung stattgefunden.
Wärmekraftwerke, die die nicht zum Betrieb der Turbine verwendete Wärme ungenutzt an die Umgebung abgeben, haben üblicherweise einen Wirkungsgrad von teils deutlich unter 50 %. Mithilfe der sogenannten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) kann die Wärme jedoch noch besser genutzt werden. So wird in einem Heizkraftwerk die nicht zum Betreiben der Turbine genutzte Wärme zum Heizen von Gebäuden verwendet (sowohl über Nah- als auch Fernwärme). Dadurch wird zwar im Kraftwerk selbst keine zusätzliche elektrische Energie erzeugt (meist sogar weniger), dafür muss aber keine weitere Energie aufgewendet werden, um die Gebäude zu beheizen. Der Brennstoff wird dadurch also besser genutzt und die Energieentwertung ein Stück weit reduziert. Der technische Aufwand für solche Kraftwerke ist allerdings auch größer, was wiederum mit höheren Kosten verbunden ist.
Für andere Kraftwerkstypen als den Wärmekraftwerken hängt der Wirkungsgrad noch von anderen Faktoren ab. Photovoltaikanlagen bestehen im Kern aus Halbleiterbauelementen. Diese besitzen im Moment einen Wirkungsgrad von lediglich 15-20 %. Wo hier die physikalische Grenze liegt, lässt sich im Moment nur schwer abschätzen und ist Gegenstand der Forschung.



Arbeitsauftrag

a) Recherchieren Sie nach der Kraft-Wärme-Kopplung und beschreiben Sie, was man in dem Zusammenhang unter einem „Nutzungsgrad“ versteht. Grenzen Sie diesen zum Wirkungsgrad eines Kraftwerks ab.
b) Skizzieren Sie auf einer Wirkungsgrad-Skala von 0 bis 1 an den passenden Stellen den Wirkungsgrad der im Text genannten Kraftwerke. Recherchieren Sie dafür ggf. nach typischen Werten.
c) Untersuchen Sie verschiedene Kraftwerkstypen (insbesondere auch solche mit Kraft-Wärme-Kopplung) im Hinblick auf ihren Wirkungsgrad. Nutzen Sie dabei den obigen Text und vergleichen Sie ihn mit selbst recherchierten Quellen. Fassen Sie Ihre Ergebnisse tabellarisch zusammen. Hinweis: Vergessen Sie dabei nicht die Windenergie und Photovoltaikanlagen!
d) Listen Sie verschiedene Prozesse auf, die bei einem Wärmekraftwerk den Wirkungsgrad beschränken. Hinweis: Die Abbildung in M1 kann dabei helfen!
e) Für die Energiewende werden viele neue Windkraftanlagen gebraucht. Zwei Prozent der Landesfläche werden in Deutschland dafür anvisiert. Schätzen Sie anhand eigener Recherchen die insgesamt erreichbare Leistung dieser Windkraftanlagen ab.

Erarbeiten Sie sich nun das jeweilige Thema Ihrer anfangs gewählten Gruppe. Sie erstellen dabei jeweils einen Steckbrief und präsentieren am Ende Ihre Ergebnisse auf Postern den anderen Gruppen. Gehen Sie hier wie gewohnt sehr sorgfältig vor, damit Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler aus den anderen Gruppen einen guten Überblick über alle Themen bekommen. Bearbeiten Sie dafür das zu Ihrer Gruppe gehörige Material der folgenden Seiten. Die Gruppen 1, 2 und 3 bearbeiten M1, die Gruppen 4, 5 und 6 bearbeiten M2.



M1 Arten der Energieerzeugung (Gruppen 1-3)

Verfügbarkeit verschiedener Energiequellen

Neben dem Wirkungsgrad (vgl. Kapitel 9.2) gibt es noch andere wichtige Faktoren, die für die Energieversorgung zu beachten sind. Einer dieser Faktoren ist die Verfügbarkeit von Energiequellen. In diesem Kontext spielt gerade bei den regenerativen Energiequellen auch der Flächenbedarf eine Rolle, da Solar- und Windenergie-Anlagen viel Platz benötigen, um ausreichende Mengen an Energie umzuwandeln. Hier tritt die Energieversorgung in Konkurrenz zur Nahrungsmittelversorgung.

Um die Weltbevölkerung, die innerhalb der nächsten Jahrzehnte auf 8 bis 9 Mrd. Menschen gestiegen sein wird, mit Nahrung zu versorgen, muss einerseits der Verlust an landwirtschaftlicher Anbaufläche gestoppt werden. Andererseits muss durch geeignete Maßnahmen bisher unfruchtbares Land, z. B. durch Aufforstung und der damit verbundenen Schaffung eines besseren Mikroklimas, mittelfristig nutzbar gemacht werden. Auch neue Wege der Nahrungsmittelbereitstellung müssen gefunden werden.



Es besteht hier ein Dilemma, da als Ersatz für fossile Brennstoffe in zunehmendem Umfang Biomasse aus landwirtschaftlichem Anbau zur Erzeugung von Biosprit und Strom genutzt werden soll. Die dafür erforderlichen Flächen gehen für die Nahrungsmittelproduktion dann allerdings verloren.

Neben dem Platzbedarf und auch damit einhergehenden Umweltaspekten spielt auch die Zuverlässigkeit bei der Energieversorgung eine Rolle: In Deutschland weht der Wind beispielsweise so unstet und zeitlich beschränkt, dass als Ausgleich schnell zu- und abschaltbare mit Erdgas betriebene Kraftwerke erforderlich sind, um die Defizite im Windstromangebot zu kompensieren. Bei Photovoltaikanlagen verhält sich die Situation analog.

Auch bei den fossile Energiequellen – Kohle, Erdöl und Erdgas – spielt die Verfügbarkeit eine Rolle: Die kostengünstigen (also leicht förderbaren) Vorräte reichen bei Kohle nur noch weniger als 100 Jahre, bei Erdgas zwischen 50 und 100 Jahren und bei Erdöl nur noch einige Jahrzehnte.

Bei der Kernenergie würde die Problematik der Verfügbarkeit nicht bestehen. Allerdings gibt es sowohl regional als auch global einen gewissen Dissens. Es gibt Länder wie z. B. Frankreich, die weiter massiv auf Kernenergie setzen, und andererseits Deutschland, wo man die Abkehr von Kernkraftwerken beschlossen hat. Es gibt inzwischen aufgrund der ernsten Versorgungsprobleme mit Erdgas aber auch in Deutschland regional eine politische Diskussion, ob die verbliebenen Kernkraftwerke nicht doch weiter betrieben werden sollten. Kernkraftwerke eigenen sich hervorragend für den Grundlastbetrieb und stellen so eine Alternative zu Kohle oder

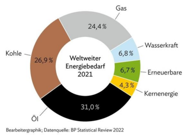
Gas dar. Der große Vorteil der Kernenergie besteht in der hohen Energiedichte, der einfachen Möglichkeiten zur Beschaffung von Brennstäben, der Vermeidung von Treibhausgasen und der Verfügbarkeit. Dem stehen Probleme bei der Endlagerung der radioaktiven Abfälle gegenüber sowie die weitreichende Gefährdung im Falle eines Unglücks. Eine in der Zukunft möglicherweise verfügbare weitere Möglichkeit ist die Kernfusion. Dabei werden weder Treibhausgase produziert noch radioaktiver Abfall. Allerdings gibt es hier noch viele technische Herausforderungen, um die bei der Fusion stattfindenden Reaktionen zuverlässig aufrechterhalten zu können.

Quantifizierung des Energiebedarfs

Neben den Größen J und kcal werden Energievorräte auch häufig in der Größe Mtoe angegeben. Das steht für Million tons of oil equivalent per year. 1 toe gibt dabei die Energiemenge an, die bei der Verbrennung von 1 Tonne Erdöl freigesetzt wird:

1 Mtoe = 11,63 TWh (Terrawattstunden) bzw. 1 Mtoe = 41,9 PJ (Petajoule) = $41{,}9 \cdot 10^{15}$ J

Der jährliche globale Bedarf an primär eingesetzter Energie belief sich 2021 auf ca. 14 800 Mtoe, das entspricht ca. 172 000 TWh. Der anteilige Bedarf an fossilen Energien (Kohle, Erdöl, Erdgas), erneuerbaren Energien (Wasserkraft, Wind, Photovoltaik, ...) und Atomkernenergie geht aus dem Diagramm hervor. Die Energie wird teils für Prozesswärme, teils für Strom und teils für Treibstoffe verwendet, wobei letztere fast ausschließlich durch Erdöl gedeckt werden und nur zu 2 % durch Biomasse.



Bearbeitergraphik; Datenquelle: BP Statistical Review 2022

Die Zusammensetzung des im deutschen Stromnetz genutzten Stroms wird mit Strommix oder Energiemix bezeichnet. Der deutsche Strommix setzte sich 2021 zu 46 % aus erneuerbaren Energien und zu 54 % aus konventionellen Energieträgern zusammen, wobei sich der Strommix seit Jahren zugunsten der Erneuerbaren verschiebt. Bei der Stromerzeugung in Deutschland bestand der konventionelle Energiemix 2021 aus Stein- und Braunkohle, Erdgas und Kernenergie. Speziell die Kernenergie ist in Deutschland aber sehr umstritten, weshalb Anfang 2023 das letzte deutsche Kernkraftwerk vom Netz genommen wurde (Stand: Mai 2023). Zum erneuerbaren Energiemix tragen Windenergie, Photovoltaik, Biomasse und Wasserkraft bei.

Insgesamt wurden 2021 in Deutschland 490 TWh, entsprechend 1764 PJ, an elektrischer Energie in das Stromnetz eingespeist. Das sind 2 % mehr als im Vorjahr (481 TWh). Nach vorläufigen Ergebnissen des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) lieferten erneuerbare Energieträger 224 TWh. Die Windenergie war mit 23 % der insgesamt eingespeisten Strommenge der wichtigste Energieträger für die Stromerzeugung 2021, gefolgt von Braunkohle mit 20 %.

Arbeitsauftrag

a) Erstellen Sie einen Steckbrief zu Ihrem Gruppenthema. Gehen Sie nach der Methode auf S. 133 vor und recherchieren Sie nach weiteren geeigneten Quellen. Verzichten Sie auch hier noch auf die Bewertung und persönliche Gewichtung bei der Nutzwertanalyse.

b) Präsentieren Sie Ihrer Klasse Ihre Rechercheergebnisse im Rahmen einer Poster Session. Hängen Sie dazu die Steckbriefe, welche die Funktion des Posters übernehmen, für alle gut sichtbar aus.

c) Vervollständigen Sie nun nach Durchsicht der anderen Poster die Nutzwertanalyse.

M2 Speicherung und Transport elektrischer Energie und Ausbau des Energienetzes (Gruppen 4-6)

Die Energiewende

In den nächsten Jahren und Jahrzehnten wird die Energiewende eine prägende Rolle in unserer Gesellschaft spielen. Die Energiewende in der heutigen Form wurde 2011 von der damaligen Bundeskanzlerin Angela Merkel als Reaktion auf den Reaktorunfall von Fukushima eingeleitet und bedeutet eine Abkehr von fossilen Energieträgern und der Kernenergie. Die Vermeidung fossiler Energieträger ist essenziell, um die Klimaerwärmung möglichst auf unter 1,5 °C zu begrenzen (wozu sich Deutschland im Jahre 2015 im Zuge des Pariser Klimaabkommens zusammen mit 195 weiteren Staaten verpflichtet hat).



© Gerhard Mester, 2015

Der Netzausbau

Durch den immer weiter steigenden Bedarf und den Ausbau verschiedener Energieformen muss auch das Energienetz mitwachsen bzw. umgestaltet werden. Mit „Energienetz“ (oder auch Stromnetz) sind die Leitungen gemeint, über die die elektrische Energie von den Kraftwerken zu den Haushalten gelangt. Häufig verlaufen diese Leitungen überirdisch und sind durch die charakteristischen Hochspannungsmasten gut sichtbar. Kritiker merken an, dass dadurch das Landschaftsbild verunstaltet wird. Alternativ können auch Erdkabel verlegt werden, die nicht nur das Landschaftsbild schonen sondern auch für weniger Elektrosmog sorgen. Der Nachteil ist allerdings, dass sie sehr teuer sind.



Beim Netzausbau sind auch die neuen Anforderungen zu beachten, die sich durch die Energiewende ergeben. So gibt es allein durch die Abschaltung der Kernkraftwerke sowie den Ausbau von Wind- und Solaranlagen (vor allem letztere finden sich auch auf vielen Häuserdächern wieder) lokal deutliche Verlagerungen und neue „Hotspots“, in denen viel Energie in das Netz eingespeist wird. Gleichzeitig müssen die Leitungen „mehrspurig“ werden: Während früher der Strom einfach vom Kraftwerk zu den Haushalten floss, speisen viele Haushalte nun selbst Strom ins Netz ein (quasi in die „Gegenrichtung“). Dazu kommt: Da speziell bei den regenerativen Energien die Effizienz bzw. der Wirkungsgrad vom Standort abhängt, muss die Energie unter Umständen über weite Strecken transportiert werden. So müssen beispielsweise neue Leitungen von den Windparks in der Nordsee hin nach Süddeutschland gebaut werden. Auch macht es Sinn, den Strom zu einem gewissen Maße aus dem Ausland zu beziehen, wenn dort bessere Bedingungen für die entsprechenden Kraftwerkstypen herrschen. Auch hierfür müssen geeignete Leitungen gebaut werden. Dazu kommt: Der Energieimport aus dem Ausland kann in Konfliktsituationen als politisches Mittel eingesetzt werden, wie sich beispielsweise beim Krieg zwischen Russland und der Ukraine gezeigt hat. Eine starke Abhängigkeit von Energieimporten kann zu gefährlichen Engpässen führen, wenn der Strom aus politischen Gründen nicht mehr nach Deutschland geliefert wird.

Um dem Problem der Schwankungen, die durch sich ständig ändernde Auslastungen von Wind- und Solaranlagen entstehen, entgegenzuwirken, wurde das Projekt „NordLink“ ins Leben gerufen. Im Zuge dessen wurde ein Seekabel von Deutschland nach Norwegen verlegt. Die Hoffnung ist, dass damit sowohl Deutschland als auch Norwegen ihren Überschuss bzw. Mangel ausgleichen können, indem der Strom aus den Windkraftwerken in Deutschland bzw. den Wasserkraftwerken in Norwegen zwischen den beiden Ländern fließen kann. Kritiker merken allerdings an, dass die Kapazitäten der norwegischen Kraftwerke nicht ausreichen, um die Schwankungen in Deutschland auszugleichen und der sehr kostspielige Bau des Nord-Link-Kabels daher nicht hätte stattfinden sollen.

Neue Speichertechnik



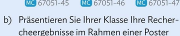
Da Photovoltaik- und Windkraftanlagen nur unregelmäßig Strom erzeugen, ist die Speicherung von elektrischer und thermischer Energie ein weiteres Problem der Energiewende. Es gibt einige vielversprechende Lösungsansätze, beispielsweise ein Hamburger Pilotprojekt zu Vulkanstein-Speichern. Das Vorhaben erscheint auf den ersten Blick ziemlich unsinnig: Windenergie soll in Vulkangestein gespeichert werden. Wie kann das funktionieren? Die Antwort: Energieumwandlung. Die Windenergie wird zunächst von den Windkraftanalgen in elektrische Energie umgewandelt. Diese wird dann dafür genutzt, um Luft zu erhitzen, sie wird also in Wärmeenergie umgewandelt. Die auf bis zu 750 °C erhitzte Luft wird dann in den Vulkangestein-Speicher gebracht. Das Vulkangestein kann diese Energie bis zu einer Woche lang speichern und bei Bedarf können damit wieder Dampfturbinen zur Stromerzeugung angetrieben werden. Wenn der Speicher voll gefüllt ist, kann er 1500 Haushalte 24 h lang mit Strom versorgen.

Da Photovoltaikanlagen häufig in Privathaushalten zu finden sind, ist es naheliegend, die so erzeugte Energie auch direkt vor Ort zu speichern. Dafür werden in den Haushalten große Akkus installiert (z. B. Lithium-Ionen-Akkus) und direkt mit dem Solarstrom aufgeladen. Alternativ kann damit aber auch Wasser erhitzt und einem Warmwasserspeicher zugeführt werden. Auf die Art kann wiederum das Haus geheizt oder die im Wasser gespeicherte Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt werden.

Arbeitsauftrag

a) Erstellen Sie einen Steckbrief zu Ihrem Gruppenthema. Nutzen Sie den für Ihre Gruppe geeigneten Mediencode, der eine Vorlage für den Steckbrief zu Ihrem Thema enthält. Gehen Sie nach der Methode auf S. 133 vor und recherchieren Sie nach weiteren geeigneten Quellen. Verzichten Sie auch hier noch auf die Bewertung und persönliche Gewichtung bei der Nutzwertanalyse.



MC 67051-45 MC 67051-46 MC 67051-47

b) Präsentieren Sie Ihrer Klasse Ihre Rechercheergebnisse im Rahmen einer Poster Session. Hängen Sie dazu die Steckbriefe, welche die Funktion des Posters übernehmen, für alle gut sichtbar aus.

c) Vervollständigen Sie nun nach Durchsicht der anderen Poster die Nutzwertanalyse.

9.4 Energieversorgung in der Zukunft

In diesem Kapitel sollen in vier Schritten praktische Lösungsansätze zur Verringerung des Energieverbrauchs gefunden werden. Sie beginnen mit einer Recherche zu Energieeinsparpotentialen. Als nächstes werden die einzelnen Möglichkeiten für Einsparmaßnahmen tabellarisch gewissen Kategorien zugeordnet. In einem dritten Schritt werden dann die einzelnen Maßnahmen bewertet. Schließlich wählen Sie Energiesparmaßnahmen aus, die Sie selbst verwirklichen wollen und können, und fixieren diese in einem *Energieeinsparvertrag*.
Weitere Vertiefungen bieten die Materialien M2 und M3. Bei M2 wird der Rebound-Effekt untersucht, der manche Energieeinsparmaßnahmen wieder zunichte machen kann. In M3 finden Sie einen Ausblick hinsichtlich zukünftiger Lösungen der Nahrungsmittel- und Energieknappheit.

M1 Energieeinsparvertrag

Um für sich persönlich festzustellen, an welchen Stellen man Energie einsparen könnte, muss man möglichst strukturiert vorgehen. Der individuelle Lebensstil ist dabei von entscheidender Bedeutung und jeder muss für sich selbst feststellen, an welchen Stellen das möglich ist. Dabei sollten Sie zwischen schulischen/beruflichen und persönlichen/privaten Maßnahmen unterscheiden. So müssen Sie beispielsweise in der Klasse Rücksicht auf Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler nehmen und können nicht einfach die Heizung nach Ihren eigenen Bedürfnissen regulieren.

Folgende Tabelle hilft bei der Zusammenstellung und Kategorisierung der einzelnen Bereiche:

	schulisch	persönlich
Digitalisierung		
Verkehr und Urlaubsreisen		
Ernährung		
Gebäude, Heizung		
sonstiger Konsum		

KEINE EINTRAGUNG!

Auch die Effizienz und die Umsetzbarkeit der jeweiligen Maßnahmen sollte bewertet werden. Hierbei hilft nebenstehende Matrix. Eine 1 steht dabei für „wenig effizient bzw. schlecht umsetzbar" und eine 4 für „sehr effizient bzw. gut umsetzbar".

U \ E	1	2	3	4
1				
2				
3				
4				

KEINE EINTRAGUNG!

Arbeitsauftrag

Schritt 1: Recherche

a) Führen Sie eine Recherche zu Energieeinsparpotentialen in der Schule und in Ihrem persönlichen Umfeld durch. Belegen Sie die Rechercheergebnisse in digitaler Form (vgl. Methode zur Recherche bzw. Quellenangabe auf S. 99/100).

b) Erarbeiten Sie sich anschließend anhand des Mediencodes die Bereiche und die konkreten Möglichkeiten, bei denen Energieeinsparmaßnahmen besonders wirksam sind. MC 67051-48

Schritt 2: Kategorisierung

c) Ordnen Sie die von Ihnen gefundenen Möglichkeiten der Energieeinsparung mithilfe der links bereitgestellten Tabelle den angegebenen Kategorien zu.

Schritt 3: Bewertung

d) Bewerten Sie die Effizienz und die Umsetzbarkeit jeder einzelnen Maßnahme auf einer Skala von 1 bis 4 (vgl. Matrix links). Für jede Maßnahme ist eine eigene Matrix notwendig.

Ein gemeinsam mit der Klasse festgelegter Energieeinsparvertrag (vgl. Darstellung unten des ISB München) hilft, sich der gesellschaftlichen und politischen Tragweite der Energiedebatte bewusst zu werden. Die Diskussion um einen solchen gemeinsamen Vertrag stellt diese Debatte im kleineren Rahmen nach und lässt Interessenkonflikte klar hervortreten. Außerdem stellt ein solcher Vertrag eine gewisse Verbindlichkeit her. Auf die Art können Sie sich leichter dazu motivieren, die im Vertrag festgehaltenen Maßnahmen auch wirklich einzuhalten und so einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

Muster für einen Energieeinsparvertrag

ENERGIEEINSPARVERTRAG

Durch die folgenden Maßnahmen werde ich persönlich Energie einsparen:

1.

2.

Durch die folgenden Maßnahmen helfe ich mit, in der Schule Energie zu sparen:

1.

2.

Ort, Datum	Unterschrift

Nach einer gewissen Zeit sollte die Einhaltung der vertraglich zugesicherten Maßnahmen und Absichtserklärungen zur Energieeinsparung kontrolliert werden. Tauschen Sie sich dazu im Klassenverband nach einer festgelegten Zeitspanne aus.
Natürlich müssen die Bemühungen des Einzelnen durch entsprechende auf gesellschaftlicher und politischer Ebene flankiert werden. Gesetzliche Vorschriften und finanzielle Anreize helfen, auch auf globaler Ebene Maßnahmen umzusetzen.

Schritt 4: Energieeinsparvertrag

e) Ziehen Sie Ihre Tabelle aus Aufgabe c) mit den Möglichkeiten der Energieeinsparung zurate und wählen Sie in Ihrer Gruppe...
   - zwei Energiesparmaßnahmen im schulischen Umfeld und
   - zwei Energiesparmaßnahmen im privaten Umfeld aus, die Sie für sich selbst verwirklichen wollen und können.

f) Formulieren Sie nun in einem Vertrag, wie Sie auf persönlicher Ebene und im gesamten Klassenverband Maßnahmen ergreifen wollen, um Energie einzusparen und damit einen Beitrag zur Begrenzung der Klimaerwärmung zu leisten. Sie können dabei die Ziele individuell formulieren oder sich gegebenenfalls im Klassenverband auf einheitliche Zielvorgaben verständigen. Die Vorlage im Mediencode hilft Ihnen bei der Gestaltung des Vertrags.



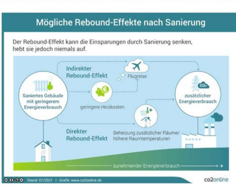
MC 67051-49

Hinweis: Es ist sinnvoll, wenn Sie nach einiger Zeit überprüfen, wie effektiv Sie bei der Einhaltung Ihrer Zielsetzungen waren.

Vereinbaren Sie dafür einen Termin, an dem Sie sich darüber austauschen, wie gut Sie die Maßnahmen umsetzen konnten und welche Schwierigkeiten es dabei gab.

M2 Rebound-Effekte

Leider kann es vorkommen, dass Energieeinsparmaßnahmen nicht zum gewünschten Erfolg führen, wenn beispielsweise die Nutzerinnen und Nutzer ihr Verhalten aufgrund der Maßnahmen ändern und so die ursprünglichen Einsparungen dadurch wieder zunichtewerden. *„Effizienzsteigerungen senken oft die Kosten für Produkte oder Dienstleistungen. Dies kann dazu führen, dass sich das Verhalten der Nutzerinnen und Nutzer ändert: Sie verbrauchen mehr - die ursprünglichen Einsparungen werden teilweise wieder aufgehoben. Dieser Effekt wird Rebound genannt."* (Quelle: Umweltbundesamt, 2019)



Beispiele für den Rebound-Effekt:

- Ein PKW wird durch Effizienzsteigerung in der Produktion billiger. Der Käufer reagiert und kauft das nächste Mal ein größeres Modell. Dadurch geht der Vorteil des günstigeren Preises verloren, da das größere Modell wiederum teurer ist.
- Die Motoren der PKW werden sparsamer. Der Nutzer reagiert und fährt jetzt häufiger mit dem Auto oder legt längere Strecken zurück. Statt also einen Beitrag zur CO_2-Vermeidung und Energieeinsparung aufgrund der technischen Entwicklung zu leisten, wird der Effekt durch die höhere Mobilität wieder aufgehoben.

Die Rebound-Effekte sind nicht zu unterschätzen und hängen stark von der Art des benutzten Produkts oder der Dienstleistung ab. Beispielsweise hat man herausgefunden, dass der Rebound bei Tätigkeiten, bei denen der Zeitfaktor eine wichtige Rolle spielt, geringer ausfällt; also bei solchen, wo Zeit nicht so wichtig ist. Für Berufspendler ist der Zeitfaktor sehr wichtig. Senkt man also die Preise für den öffentlichen Nahverkehr, wird der Pendler deswegen nicht öfter fahren. Bei Urlaubsflügen spielt hingegen der Zeitfaktor keine so große Rolle. Senkt man also die Preise für Flugreisen, ist damit zu rechnen, dass der Verbraucher trotz eventuell längerer Wartezeiten häufiger in den Urlaub fliegen wird.

An letzterem Beispiel ist auch gut zu sehen, dass man durch Maßnahmen des Gesetzgebers hier regulierend eingreifen könnte, indem man beispielsweise Flugreisen mit höheren Umweltabgaben belegen könnte. In diesem Zusammenhang wird schon erfolgreich in der EU der Emissionshandel für CO_2-Emission durchgeführt. Dabei wird eine Obergrenze für die Treibhausgas-Emissionen festgelegt, die von den jeweiligen Anlagen (Fabriken, Flugzeuge etc.) ausgestoßen werden dürfen. Soll die Anlage eine größere Menge an Emissionen ausstoßen, müssen dafür sogenannte Emissionsberechtigungen erworben werden. Je mehr Emissionen eine Anlage ausstößt, desto teurer wird es also für den Betreiber. So wird ein Anreiz geschaffen, um Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren.

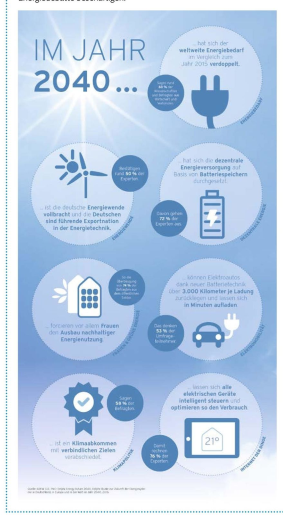


Arbeitsauftrag

Diskutieren Sie in Ihrer Gruppe Rebound-Effekte bei ausgewählten Energieeinsparmaßnahmen.

M3 Ausblick und Zukunftsvision

Grundlagenforschung ist eine Notwendigkeit, die Freiheit für wirklich neue Ideen bietet. Auf dieser Seite sollen Sie eigenes Wissen, Rechercheergebnisse und neue Forschungsansätze kombinieren. Außerdem sollen Sie sich mit dem Thema *Grundlagenforschung* am Beispiel der Energiedebatte beschäftigen.



Arbeitsauftrag

a) Erkunden Sie im Rahmen einer Recherche, welche neuartigen Methoden und Techniken entwickelt oder erforscht werden sollten, um für ausreichend Nahrung und ausreichend Energie (in Form von Wärme, Strom und Treibstoffen) zu sorgen. Denken Sie hierbei an Verbesserungsmöglichkeiten in der klassischen Landwirtschaft, an eine massive Steigerung der Nutzung der Sonnenenergie, an die Entwicklung neuer Kondensator/Batterie-Stromspeicher, …

b) Stellen Sie eine der von Ihnen erkundeten Methoden bzw. Techniken vor. Gehen Sie dabei auch auf die aktuell noch vorhandenen Schwierigkeiten ein und versuchen Sie einzuordnen, wie realistisch Sie die Umsetzung der Methode bzw. Technik finden.

c) Diskutieren Sie die Bedeutung der Grundlagenforschung und die Rolle, die zu strenge Vorgaben in Form von …
   - aufwändiger Bürokratie
   - zu engen zeitlichen Zielvorgaben
   - einer aufwändigen Evaluierung seitens der Geldgeber

   spielen. Berücksichtigen Sie dabei auch, dass häufig noch gar nicht absehbar ist, wozu die Grundlagenforschung in einem bestimmten Fachgebiet später mal genutzt werden kann.

Selbsttest: Überprüfen Sie Ihre Kenntnisse und Kompetenzen selbst



Selbsttest-Checkliste

- ✓ Bearbeiten Sie die Aufgaben schriftlich in ordentlicher Form. Die Auswertungstabelle zeigt die Kompetenzerwartungen und Hilfestellungen.
- ✓ Vergleichen Sie Ihre Lösungen mit den Lösungsskizzen auf Seite 207-209.
- ✓ Bewerten Sie nun Ihre Lösungen selbst mit den Symbolen ☺, 😐 oder ☹.

1 a) Erläutern Sie den Unterschied zwischen reversiblen und irreversiblen Vorgängen anhand eines selbstgewählten Beispiels und verdeutlichen Sie, dass irreversible Vorgänge immer mit einer Energieentwertung verbunden sind.
b) Definieren Sie den Begriff „Wirkungsgrad“ und erläutern Sie, dass der Wirkungsgrad eines Kraftwerks immer beschränkt ist.

2 a) Geben Sie einen Überblick über die Energiequellen, die für die Stromerzeugung in Deutschland genutzt werden („Strommix“).
b) Erläutern Sie die Potentiale von mindestens vier der unterschiedlichen Energieträger. Gehen Sie dabei auch auf die Verfügbarkeit von Ressourcen sowie Umweltfragen ein. Fassen Sie Ihre Ergebnisse in Tabellenform zusammen.



c) Erläutern Sie die Vor- und Nachteile zwischen einer regionalen und einer globalen Energieversorgung, bzw. zwischen einer zentralen und dezentralen Energieversorgung.

3 a) Beschreiben Sie die wichtigsten Aspekte einer „Nutzwertanalyse“.
b) Recherchieren Sie Aspekte, die bei einer Nutzwertanalyse zum Thema „Installation einer Photovoltaikanlage auf dem eigenen Hausdach“ eine Rolle spielen.

4 Nennen und diskutieren Sie mit Ihrer Banknachbarin/Ihrem Banknachbarn Energieeinsparpotentiale im Kontext Ihrer persönlichen Lebensgestaltung.

Auswertungstabelle

	Ich kann...	Hilfe
1	den Unterschied zwischen reversiblen und irreversiblen Vorgängen erklären und weiß, dass irreversible Vorgänge immer mit einer Energieentwertung verbunden sind, und ich kann die Problematik des beschränkten Wirkungsgrads eines Kraftwerks erläutern.	S. 134ff
2	einen Überblick über Energiequellen und die aktuelle Struktur der Energieversorgung geben.	S. 138ff
3	mithilfe recherchierter Daten eine „Nutzwertanalyse“ zu einem Thema der Energieversorgung durchführen.	S. 132ff
4	zu zentralen Fragen und Problemen der Energieversorgung fundiert Stellung nehmen.	S. 132ff

Reversible und irreversible Vorgänge

Bei einem reversiblen Vorgang ist der Prozess zeitlich umkehrbar, kann also wieder vollständig rückgängig gemacht werden.
Ein irreversibler Prozess kann dagegen nur in eine Richtung stattfinden, da im Laufe des Prozesses eine Energieentwertung stattfindet, bei der die jeweilige Energieform (z. B. innere Energie) nicht wieder für die Umkehr des Prozesses genutzt werden kann.

(näherungsweise) reversible Vorgänge: Flummi, Bewegung der Erde um die Sonne
irrversible Vorgänge: zersprungenes Glas, Sprung vom 3-Meter-Brett

Wirkungsgrad von Kraftwerken

Bei der Bildung des Wirkungsgrads für ein gesamtes Kraftwerk finden nicht alle Energieformen Verwendung: In den Zähler setzt man die Energieform ein, die man durch das Kraftwerk maximieren will, und in den Nenner die zugeführte Energieform:

$$\eta_{\text{Kraftwerk}} = \frac{\text{vom Generator abgegebene elektrische Energie}}{\text{den Brennstoffen entnommene chemische Energie}}$$

Der Wirkungsgrad eines Wärmekraftwerks wird insbesondere durch die Energieentwertung aufgrund der Abgabe von innerer Energie an die Umgebung beschränkt.

Der Wirkungsgrad η stellt allgemein das Verhältnis des Betrags der genutzten Energieformen ΔE_{nutz} zum Betrag der aufgewendeten Energieformen ΔE_{auf} dar:

$$\eta = \frac{\Delta E_{\text{nutz}}}{\Delta E_{\text{auf}}} = \frac{\Delta P_{\text{nutz}}}{\Delta P_{\text{auf}}}$$

Mit der Kraft-Wärme-Kopplung kann der Brennstoff eines Kraftwerks effektiver genutzt werden.

Aspekte der Energieversorgung

Allgemein lässt sich eine Einteilung in fossile (Gas, Öl, Kohle, Torf) und regenerative (Wind, Sonne, Wasser, Geothermie...) Energieträger sowie Kernenergie (Spaltung und Fusion) durchführen.
Für die Energieversorgung spielen neben dem Wirkungsgrad solcher Energieträger auch andere Faktoren wie die Verfügbarkeit, Flächenbedarf, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Umweltaspekte, Kosten, ... eine wichtige Rolle.
Die Energiewende in Deutschland bedeutet eine Abkehr von fossilen Energieträgern und der Kernenergie. Damit kommen auch neue Anforderungen an die Infrastruktur hinzu: Das Energienetz muss mitwachsen und umgestaltet werden.
Dabei stellen sich u. a. die Fragen, inwiefern das Landschaftsbild durch Hochspannungsmasten beeinträchtigt werden soll und wie es umsetzbar ist, dass nun auch private Haushalte durch Photovoltaikanlagen Strom ins Netz einspeisen. Auch müssen für die neuen Energieformen ausreichend Speichermöglichkeiten geschaffen werden.

Da die Fläche auf der Erde begrenzt ist, treten die Energieformen teilweise in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion.

D \ Profilbereich

Kleinschrittmethode Cladding Dopplereffekt
Noise Cancelling Startbedingungen
Strommix Photovoltaik Lichtwellenleiter
Wechselrichter analytisches Verfahren Photoleitfähigkeit
Solarmodul Amortisationszeit Schalldämpfung
Luftwiderstandsbeiwert Lichtmorsen Signalsenke Planspiel
Chladnische Klangfigur MPP-Tracker numerisches Verfahren
Maximal Power Point

Sie können in diesem Kapitel entdecken ...

- was die Methode der kleinen Schritte ist und wie mit diesem numerischen Verfahren physikalische Systeme modelliert werden können. Dabei nutzen Sie geeignete Software und erstellen passende Diagramme.
- wie sich die *U*-*I*-Kennlinie einer Solarzelle experimentell untersuchen lässt. Dabei sammeln Sie Erkenntnisse über den Maximum Power Point.
- wie Photovoltaikanlagen funktionieren und wie man deren Nutzen bewertet.
- welche Möglichkeiten eine außerunterrichtliche Aktivität bietet und wie Sie diese sinnvoll planen.
- welche vertiefenden Erkenntnisse Sie aus den Bereichen Jahrmarktsphysik, Akustik, Licht und Computermodellierung gewinnen können.



10 Die Methode der kleinen Schritte

Versuche und Materialien zu Kapitel 10.1

M1 Lernaufgabe: Stratosphärensprung



Der Fallschirmsprung aus der Stratosphäre von Felix Baumgartner im Jahr 2012 war ein absoluter Rekordsprung. Nie zuvor sprang ein Mensch aus größerer Höhe ab (39 km), erreichte im freien Fall eine höhere Geschwindigkeit (1343 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$) oder war im freien Fall länger in der Luft unterwegs (4 min 19 s). Ein solcher Sprung muss vorher gut geplant werden, um die Belastung für Mensch und Material abschätzen zu können. Dafür wurden im Vorfeld einige physikalische Berechnungen durchgeführt.

Wenn man die Luftreibung vernachlässigt, gelten die Gesetzmäßigkeiten, die Sie in der Jgst. 10 kennen gelernt haben:
$F_G = -mg$; $v(t) = -gt$; $y(t) = -\frac{1}{2}gt^2$

Für eine realistische Beschreibung muss aber die Luftreibung berücksichtigt werden. Sie bewirkt eine Kraft F_L entgegen der Fallrichtung. Ihr Betrag hängt dabei von mehreren Faktoren ab, vor allem aber von der momentanen Fallgeschwindigkeit, denn diese geht quadratisch in die Formel ein:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \varrho \cdot A \cdot v^2$$

Die einzelnen Größen bedeuten:

- c_w: Luftwiderstandsbeiwert (hängt von der Form des Körpers ab, beim kopfüber fallenden Springer: 0,65)
- ϱ: Dichte der Luft
- A: Querschnittsfläche des Körpers (kopfüber: 0,80 m²)
- v: Relativgeschwindigkeit zur Luft

Neben der Tatsache, dass die Dichte der Luft von der Temperatur und der Höhe abhängt, in der man sich über dem Erdboden befindet, mussten die Ingenieure bei der Planung des Sprungs berücksichtigen, dass auch die Fallbeschleunigung g von der Höhe über dem Erdboden sowie von der der geographischen Breite abhängt.

Arbeitsauftrag

a) Zeigen Sie durch Rechnung, dass die Fallzeit deutlich kürzer und die maximale Fallgeschwindigkeit beim Sprung aus 39 km Höhe deutlich größer sind, wenn man die Luftreibung vernachlässigt.

b) Bei der Geschwindigkeit von 1400 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ wirkte eine starke Luftreibungskraft auf Baumgartner. Diese Luftreibungskraft F_L war zu dem Zeitpunkt betragsmäßig so groß wie seine Gewichtskraft F_G einschließlich der Ausrüstung (m = 121 kg). Ermitteln Sie durch einen Kraftansatz die Dichte der Luft am Ort des Geschwindigkeitsrekords. Vergleichen Sie sie mit der Luftdichte auf Meereshöhe (1,23 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).

c) Suchen Sie mit den Begriffen „multi-angle views", „Mission data" und „Baumgartner" nach einem Video, aus dem Sie die Echtzeitdaten des Sprungs ablesen können.
Erstellen Sie mithilfe der Daten ein quantitatives t-v- und t-y-Diagramm des Sprungs und erklären Sie seinen Verlauf.

▶M2 Einstieg: Suppe auslöffeln



Was hat eine Tomatensuppe mit Physik zu tun? Das Auslöffeln der Suppe soll eine Analogie sein, um die in diesem Kapitel behandelte Methode der kleinen Schritte leichter nachvollziehen zu können.
Während Sie die Suppe essen, wird das anfängliche Volumen der Suppe schrittweise mit jedem geschöpften Löffel weniger. Das jeweils aktuelle Suppenvolumen lässt sich aus dem vorherigen Suppenvolumen berechnen, aus dem der letzte Löffel noch nicht herausgeschöpft wurde:

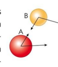
$$V_{neu} = V_{alt} - V_{Löffel}$$

Das Suppenvolumen sinkt also nicht kontinuierlich-linear, sondern diskontinuierlich in Stufenform – eben immer dann, wenn Sie erneut mit dem Löffel etwas Suppe aus der Schüssel schöpfen.

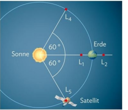
Arbeitsauftrag

a) Erstellen Sie ein Zeit-Volumen-Diagramm in Stufenform. Gehen Sie davon aus, dass zum Zeitpunkt $t = 0$ die Suppe ein Volumen von 300 ml besitzt und das Fassungsvermögen des Löffels 20 ml beträgt. Nehmen Sie an, dass immer 2,0 s vergehen, bis Sie den nächsten Löffel geschöpft haben.
b) Beschreiben und begründen Sie in zwei Sätzen die Änderung des Diagramms, wenn man einen kleineren Löffel nimmt.

▶M3 Einstieg: Das Dreikörperproblem



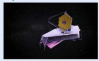
Seit Isaac Newton kennt man das Gravitationsgesetz, mit dem sich die Bewegung aller Himmelskörper beschreiben lässt. Newton hatte es für zwei Körper formuliert. Aber schon bei drei Körpern, die sich bewegen und gegenseitig anziehen, ist eine exakte Lösung nicht möglich, geschweige denn bei acht Planeten, die sich um die Sonne bewegen. Das Dreikörperproblem lässt sich nur durch numerische Verfahren näherungsweise lösen.



Im „eingeschränkten Dreikörperproblem“ wird der Spezialfall betrachtet, dass einer der drei Körper eine verschwindend kleine Masse besitzt und praktisch keine Gravitationskraft auf die anderen ausübt. So wie der Satellit in der Zeichnung links, dessen Masse im Vergleich zur Sonne und der Erde sehr klein ist.
Das eingeschränkte Dreikörperproblem spielt in der Astronomie, etwa bei Forschungssatelliten, eine wichtige Rolle. Hier werden Orte gesucht, an denen sich Satelliten stabil aufhalten können: Die sogenannten „Lagrange-Punkte“. Durch die vernachlässigte Masse des Satelliten ist es möglich, diese Lagrange-Punkte analytisch zu bestimmen (im Gegensatz zum allgemeinen Dreikörperproblem).

Arbeitsauftrag

a) Informieren Sie sich über das Dreikörperproblem im Internet. Skizzieren Sie über eine Zeitleistendarstellung die historische Entwicklung zu diesem Problem und die beteiligten Wissenschaftler.
b) Suchen Sie nach Informationen zu den Lagrange-Punkten und formulieren Sie eine prägnante Definition.
c) Das James-Webb-Teleskop ist ein Weltraumteleskop, das seit Januar 2022 im Lagrange-Punkt L_2 des Sonne-Erde-Systems kreist. Beschreiben Sie die Lage dieses Punktes und nennen Sie Vorteile für die Positionierung des Teleskops in dessen Nähe.



„Natura non facit saltus“ – Die Natur macht keine Sprünge

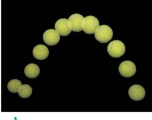
In der klassischen Philosophie und Naturwissenschaft wurde seit Aristoteles mit dem Satz „Die Natur macht keine Sprünge.“ zum Ausdruck gebracht, dass sich Veränderungen in der Natur nicht sprunghaft und diskontinuierlich vollziehen. Doch spätestens seit der Evolutionstheorie oder der Quantenphysik gilt diese Regel nur eingeschränkt. Auch mathematische Modelle von physikalischen Vorgängen können Sprünge beinhalten. Manche physikalischen Probleme lassen sich sogar nur mit Sprüngen lösen.

Immer von Interesse: Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung

So geraten wir etwa beim freien Fall mit Luftreibung (vgl. M1) in einen Kreislauf gegenseitiger Abhängigkeiten, wenn wir die Bewegungsgrößen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung auf normalem Weg berechnen wollen: Die Momentangeschwindigkeit v hängt von der Momentanbeschleunigung a ab. Die Momentanbeschleunigung wiederum hängt von der Luftreibungskraft F_L ab, welche ihrerseits wieder von der Momentangeschwindigkeit abhängt, vgl. B1. Dieses Problem tritt häufig bei nichtkonstanten Beschleunigungen auf, also bei Bewegungen, bei denen die Kraft nicht konstant ist. Will man solche Bewegungen mathematisch beschreiben, sind für eine exakte Lösung sehr aufwändige Rechnungen nötig. Eine Alternative zur exakten Berechnung besteht jedoch darin, die Bewegung als eine Art Stop-Motion-Film zu betrachten, bei der statische Einzelbilder aufeinanderfolgen – ähnlich einer Stroboskopdarstellung (vgl. B2). Diese Art der Mathematisierung nennt man ein numerisches Näherungsverfahren. Ein solches Näherungsverfahren ist auch die Methode der kleinen Schritte. Der Begriff „Näherungsverfahren“ impliziert, dass Vereinfachungen durchgeführt wurden. Neben der Näherung, dass sich die Größen nicht kontinuierlich sondern nur sprungweise verändern, zeichnet sich die Methode der kleinen Schritte dadurch aus, dass die Größen in jedem Schritt aus den Werten des vorherigen Schritts berechnet werden.



B1 Abhängigkeiten beim freien Fall mit Luftreibung.



B2 Stroboskopdarstellung einer beschleunigten Bewegung.

Drei Vereinfachungen der Methode der kleinen Schritte

- Die Zeit wächst nicht kontinuierlich, sondern springt in kleinen Schritten Δt.
- Auch die Größen Kraft, Beschleunigung, Ort und Geschwindigkeit verändern sich sprunghaft. Zwischen zwei Sprüngen werden diese Größen näherungsweise als konstant angenommen.
- In jedem Schritt werden die aktuellen Werte von Ort und Geschwindigkeit aus den Größen des vorherigen Schrittes berechnet. Das Gleiche gilt auch für Kraft und Beschleunigung.

Vergleich zum bisherigen Verfahren

Bisher konnten Sie die Bewegungsgrößen zu einem beliebigen Zeitpunkt t errechnen, indem Sie die Funktionswerte $x(t)$, $v(t)$ und $a(t)$, die diese Bewegung beschrieben haben, berechnet haben. Dies nennt man analytisches Verfahren. Der Unterschied zwischen dem analytischen und numerischen Verfahren soll in der folgenden Tabelle für eine Bewegung mit konstanter Kraft dargestellt werden.

Bisheriges Verfahren (analytisches Verfahren)	Methode der kleinen Schritte (numerisches Verfahren)
Beispiel: F = const., a = const.	Beispiel: F = const., a = const.
t wächst kontinuierlich: t	t wächst sprunghaft in kleinen Schritten Δt: $t_{neu} = t_{alt} + \Delta t$
t-Diagramm:	t-Diagramm:
v wächst proportional mit der Zeit t: $v(t) = a \cdot t$	v ist während Δt konstant und springt dann um Δv: $v_{neu} = v_{alt} + \Delta v$ (wobei $\Delta v = a_{neu} \cdot \Delta t$ ist)
t-v-Diagramm:	t-v-Diagramm:
x wächst quadratisch mit der Zeit t: $x(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$	x wächst sprunghaft in kleinen Schritten Δx: $x_{neu} = x_{alt} + \Delta x$ (wobei $\Delta x = v_{neu} \cdot \Delta t$ ist)
t-x-Diagramm	t-x-Diagramm
Jeder Wert von x, v und a wird *unabhängig* von den anderen Werten berechnet.	Jeder Wert von x, v und a wird *aus den jeweils vorangehenden Werten* berechnet.

Je kleiner die Zeitspannen Δt in der Methode der kleinen Schritte gewählt werden, desto mehr nähern sich die Stufen dem tatsächlichen Verlauf des Graphen an.

Anwendung der Methode der kleinen Schritte beim freien Fall

Das Berechnungsprinzip der Methode der kleinen Schritte soll jetzt am Beispiel eines Fallschirmspringers im freien Fall verdeutlicht werden. Die zentrale Frage lautet: Wo befindet sich der Springer zu einem beliebigen Zeitpunkt, wie schnell ist er und welche Beschleunigung erfährt er?

Auf den Fallschirmspringer wirkt die nach unten gerichtete Gewichtskraft $\vec{F}_G$ und die nach oben gerichtete Luftreibungskraft $\vec{F}_L$ (vgl. B1 und M1). Die resultierende Gesamtkraft $\vec{F}_{res}$ auf den Fallschirmspringer ist damit:

$\vec{F}_{res} = \vec{F}_G + \vec{F}_L$

B1 Relevante Kräfte beim freien Fall.

Wenn die y-Achse nach oben zeigt, bedeutet das für die Zahlenwerte:

$F_{res} = -F_G + F_L$

$F_{res} = -mg + \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \varrho \cdot A \cdot v^2$

Bedeutung der Variablen:
c_w: Luftwiderstandsbeiwert (hängt ab von der Form des Körpers)
ϱ: Dichte der Luft
A: Querschnittsfläche des umströmten Körpers
v: Relativgeschwindigkeit zur Luft (Fallgeschwindigkeit)

Weil die Luftreibungskraft F_L von der Fallgeschwindigkeit abhängt, ist auch die resultierende Kraft F_{res} zeitlich nicht konstant, ebenso wie die Beschleunigung a:

$a_{res} = \frac{F_{res}}{m}$

Um eine solche Bewegung mit nicht-konstanter Beschleunigung modellieren zu können, nehmen wir in der Methode der kleinen Schritte folgende Näherung vor: Innerhalb des kleinen Zeitabschnitts Δt sehen wir die Kraft als konstant an. Sie ändert sich erst beim Wechsel zum nächsten Abschnitt. Um die Werte für jeden neuen Zeitabschnitt automatisiert berechnen zu können, nutzen wir ein Tabellenkalkulationsprogramm.

Startbedingungen und Rechenvorschriften

Unter diesem Mediencode können Sie die zugehörige Tabellenkalkulations-Datei herunterladen:

MC 67051-50

Zunächst müssen die Anfangswerte definiert werden. Sie bilden den 1. Schritt, von dem aus man zum 2. Schritt kommt, anschließend zum 3. Schritt und so weiter. Die Ausgangshöhe sei $y_0 = 3000$ m. Das Zeitintervall dt in der Tabelle entspricht dem Zeitschritt Δt. Je kleiner dieses Zeitintervall gewählt wird, desto mehr Rechenschritte müssen getätigt werden, aber desto besser ist die Näherung.

	A	B	C	D
1	**Freier Fall (mit Luftwiderstand)**			
2	**Anfangswerte**			
3	Starthöhe	y_0 =	3000	m
4	Startgeschwindigkeit	v_0 =	0	m/s
5	Startzeit	t_0 =	0	s
6	Zeitintervall	dt =	0,1	s
7	Ortsfaktor	g =	9,81	m/s²
8	Masse	m =	100	kg
9	Querschnittsfläche	A =	1	m²
10	Dichte	rho =	1,23	kg/m³
11	Widerstandsbeiwert	c_w =	0,5	

B2 Tabellarische Auflistung in einem Kalkulationsprogramm.

Als nächstes werden die Rechenvorschriften entwickelt, also die vereinfachenden Annahmen. Damit kann man den jeweils „neuen" Wert jeder Bewegungsgröße aus dem „alten" Vorgängerwert ermitteln:

$t_{neu} = t_{alt} + \Delta t$

$F_{neu} = -mg + \frac{1}{2} c_w \varrho A v_{alt}^2$

$a_{neu} = \frac{F_{neu}}{m}$

$v_{neu} = v_{alt} + \Delta v \quad \text{mit} \quad \Delta v = a_{neu} \cdot \Delta t$

$y_{neu} = y_{alt} + \Delta y \quad \text{mit} \quad \Delta y = v_{neu} \cdot \Delta t$

Einen Unterstrich verwendet man im Tabellenprogramm dafür, dass der nachfolgende Ausdruck ein tiefgestellter Index ist:
y_0 = y_0

Eine weitere Vereinfachung zum Tippen ist die Gleichsetzung:
dt = Δt

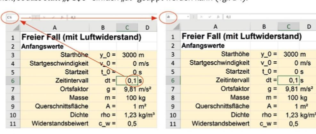
Vereinfachende Annahmen
t_neu = t_alt + **dt**
F_neu = -**m*g** + (**c_w** * **rho** * **A** * v_alt^2)/2
a_neu = F_neu/**m**
v_neu = v_alt + a_neu * **dt**
y_neu = y_alt + v_neu * **dt**

B3 Einzeilige Darstellung in der Tabelle. Die fett gedruckten Parameter sind Konstanten.

Eingaben zur Berechnung der Zellen

Bei automatisierten Berechnungen in Tabellenkalkulationsprogrammen verwendet man häufig absolute Zellbezüge. Diese Zellen müssen dabei über das $-Zeichen angesprochen werden, z. B. muss die Zelle C6 mit dem Wert 0,1 für dt mit „C6" bezeichnet werden. Eine Umbenennung häufig verwendeter Zellen führt zu mehr Übersichtlichkeit, sodass statt „C6" einfach „dt" getippt werden kann (vgl. B4).

Absolute Zellbezüge sorgen dafür, dass beim automatischen Ausfüllen einer Tabelle der Zellbezug nicht verschoben wird, wodurch immer auf diese Zelle verwiesen wird.



C6 | 0,1

	A	B	C	D
1	**Freier Fall (mit Luftwiderstand)**			
2	**Anfangswerte**			
3	Starthöhe	y_0 =	3000	m
4	Startgeschwindigkeit	v_0 =	0	m/s
5	Startzeit	t_0 =	0	s
6	Zeitintervall	dt =	0,1	s
7	Ortsfaktor	g =	9,81	m/s²
8	Masse	m =	100	kg
9	Querschnittsfläche	A =	1	m²
10	Dichte	rho =	1,23	kg/m³
11	Widerstandsbeiwert	c_w =	0,5	

dt | 0,1

	A	B	C	D
1	**Freier Fall (mit Luftwiderstand)**			
2	**Anfangswerte**			
3	Starthöhe	y_0 =	3000	m
4	Startgeschwindigkeit	v_0 =	0	m/s
5	Startzeit	t_0 =	0	s
6	Zeitintervall	dt =	0,1	s
7	Ortsfaktor	g =	9,81	m/s²
8	Masse	m =	100	kg
9	Querschnittsfläche	A =	1	m²
10	Dichte	rho =	1,23	kg/m³
11	Widerstandsbeiwert	c_w =	0,5	

Vorgenommene Umbenennungen:
C3 = y_0
C4 = v_0
C5 = t_0
C6 = dt
C7 = g
C8 = m
C9 = A
C10 = rho
C11 = c_w

B4 \ Das Umbenennen von Zellen, die häufig in absoluten Zellbezügen verwendet werden, sorgt für größere Übersichtlichkeit.

In die erste Zeile der Wertetabelle werden die Anfangswerte eingetragen – entsprechend den Umbenennungen (vgl. B5). Ab der zweiten Zeile werden die Formeln entsprechend den Rechenvorschriften eingegeben (vgl. B6). Das geschieht ab der dritten Zeile am einfachsten durch Kopieren der Zellinhalte (vgl. B7). Die Zellbezüge werden dabei automatisch angepasst. Wird die Tabelle nun für viele Zeilen nach unten verlängert, werden die Werte der Bewegungsgrößen zu jedem beliebigen Zeitpunkt angezeigt.

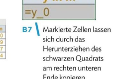
	A	B	C	D	E
13	t in s	F in N	a in m/s²	v in m/s	y in m
14	=t_0	=-m*g	=B14/m	=v_0	=y_0

B5 \ Die Anfangswerte in der ersten Zeile der Tabelle (Zeile 14 im Dokument).

	A	B	C	D	E
13	t in s	F in N	a in m/s²	v in m/s	y in m
14	=t_0	=-m*g	=B14/m	=v_0	=y_0
15	=A14+dt	=-m*g+(c_w*rho*A*D14^2)/2	=B15/m	=D14+C15*dt	=E14+D15*dt
16	=A15+dt	=-m*g+(c_w*rho*A*D15^2)/2	=B16/m	=D15+C16*dt	=E15+D16*dt
17	=A16+dt	=-m*g+(c_w*rho*A*D16^2)/2	=B17/m	=D16+C17*dt	=E16+D17*dt

	A	B	C	D	E
13	t in s	F in N	a in m/s²	v in m/s	y in m
14	0	-981	-9,81	0,00	3000,0
15	0,1	-981	-9,81	-0,98	2999,9
16	0,2	-981	-9,81	-1,96	2999,7
17	0,3	-980	-9,80	-2,94	2999,4

B6 \ Die Formelansicht (links) und Zahlenansicht (rechts) der ersten vier Zeilen. Zwischen den beiden Ansichten kann man mit der Tastenkombination **Strg+Umschalt+Apostroph** wechseln.



B7 \ Markierte Zellen lassen sich durch das Herunterziehen des schwarzen Quadrats am rechten unteren Ende kopieren.

Arbeitsaufträge

1 \ Erklären Sie die Methode der kleinen Schritte mithilfe einer graphischen Darstellung, z. B. eines Flussdiagramms, und anhand eines Beispiels einer Bewegung, bei der die Kraft nicht konstant ist (z. B. freier Fall mit Luftreibung; Federpendel).

2 \ Beim freien Fall mit Luftreibung stellt sich nach einiger Zeit eine Gleichgewichtsgeschwindigkeit ein, bei der der Betrag der Luftreibungskraft F_L dem Betrag der Gewichtskraft F_G entspricht.

a) Leiten Sie einen Ausdruck her, mit dem sich diese Geschwindigkeit berechnen lässt.

b) Berechnen Sie die Gleichgewichtsgeschwindigkeit mit den Anfangswerten gemäß B2 von S. 154.

3 \ Führen Sie mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms die Methode der kleinen Schritte für den freien Fall eines Fallschirmspringers mit Luftwiderstand bis $t = 60$ s durch. Wählen Sie die Anfangswerte gemäß B2 von S. 154.

a) Beschreiben Sie, wie sich die Werte der Bewegungsgrößen entwickeln und erklären Sie sie.

b) Ermitteln Sie die Gleichgewichtsgeschwindigkeit und vergleichen sie mit dem Wert von Aufgabe 2b.

c) Variieren Sie die Anfangswerte; sehen Sie z. B. den Fallschirm als geöffnet an (c_w = 1,35; A = 40 m²). Vergleichen Sie die Fallzeit und die Gleichgewichtsgeschwindigkeit mit Aufgabe 3a.

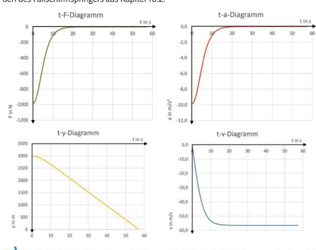
Diagramme zeigen mehr

Mithilfe von Diagrammen lassen sich die Werte, die über die Methode der kleinen Schritte erzeugt wurden, leichter veranschaulichen. In den in B1 dargestellten Diagrammen sieht man den zeitlichen Verlauf der resultierenden Kraft und der Bewegungsgrößen des Fallschirmspringers aus Kapitel 10.2.

Hier finden Sie ein Erklärvideo, wie man aus einer mehrspaltigen Tabelle Diagramme erzeugt:



MC 67051-51



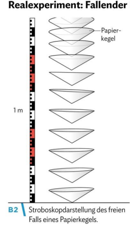
B1 Zeit-Kraft-, Zeit-Beschleunigungs-, Zeit-Orts- und Zeit-Geschwindigkeitsdiagramme des freien Falls eines Fallschirmspringers mit 100 kg Masse aus 3000 m Höhe.

Doch wie gut passen die Vorhersagen der Methode der kleinen Schritte zur Realität? Das soll der Vergleich mit einem Realexperiment zeigen.

Realexperiment: Fallender Papierkegel

Benötigte Materialien:
- Papier, Zirkel
- Schere, Kleber
- Maßstab, Stoppuhr
- Kamera (Smartphone)
- Dunkler Hintergrund
- Software zur Videoanalyse

Ein frei fallender Papierkegel geht schnell von einer ungleichmäßig beschleunigten Bewegung in eine gleichförmige Bewegung mit konstanter Endgeschwindigkeit über (vgl. B2). Außerdem lassen sich recht einfach die Parameter wie Masse (z. B. mit Büroklammern), Luftwiderstandsbeiwert (über den Öffnungswinkel des Kegels) und Querschnittsfläche (über den Radius *r* der Kegelgrundfläche) ändern. Damit eignet sich der Papierkegel gut, um die Vorhersagen der Methode der kleinen Schritte zum Fallschirmsprung zu überprüfen.



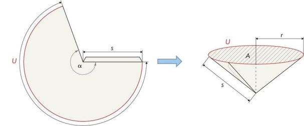
B2 Stroboskopdarstellung des freien Falls eines Papierkegels.

Der Papierkegel lässt sich einfach selbst basteln. In B3 ist ein passendes Schnittmuster dargestellt, dieses kann auch über den Mediencode in der Randspalte heruntergeladen und einfach ausgedruckt werden. Der gewählte Mittelpunktswinkel von $\alpha = 250°$ sorgt dafür, dass der Papierkegel beim Experiment nicht so leicht ins Trudeln gerät und auch nicht zu schnell absinkt. Der Radius des Kreissektors sollte ausreichend groß gewählt werden, im Bereich von 5-10 cm liefert das Experiment gute Ergebnisse.

Schnittmuster für den Papierkegel:



MC 67051-52



B3 \ Schnittmuster eines Papierkegels.

Arbeitsaufträge

1 \ a) Basteln Sie einen Papierkegel (gemäß Schnittmuster im Mediencode oben) und messen Sie die relevanten Größen. Führen Sie nun die Methode der kleinen Schritte mit den in der Tabelle vorgeschlagenen Anfangswerten sowie den Werten für die Masse und der Querschnittsfläche Ihres selbst gebastelten Kegels durch. Erstellen Sie anschließend eine Vorhersage über den Verlauf der Bewegung, indem Sie die t-a-, t-v- und t-y-Diagramme der Bewegung erstellen.

Anfangswerte	
c_w	0,55
ϱ	$1{,}23\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
y_0	2,00 m

b) Führen Sie nun das Experiment durch, indem Sie den Kegel aus der Höhe von 2,00 m fallen lassen. Ermitteln Sie die Gleichgewichtsgeschwindigkeit des Papierkegels für den letzten Meter seines freien Falls durch einfache Zeitmessung (Tipp: Erhöhen Sie die Messgenauigkeit, indem Sie eine Mehrfachmessung durchführen und den Mittelwert bestimmen.).

c) Nehmen Sie ein Video des Falls auf. Achten Sie auf eine fixierte Kameraposition in größerer Entfernung zur Fallbewegung, einen möglichst homogenen, dunklen Hintergrund und einen Maßstab bekannter Länge im Bild, vgl. B2. Der Ursprung des Koordinatensystems sei der Auftreffort am Boden.

d) Führen Sie eine Videoanalyse durch und erstellen Sie die t-a-, t-v- und t-y-Diagramme.

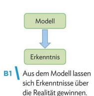
e) Sie haben nun drei Werte für die Gleichgewichtsgeschwindigkeit (durch die Schritte a, b und d). Ordnen Sie die Werte nach ihrer Präzision und Güte. Geben Sie Begründungen dafür an.

f) Vergleichen Sie die durch das Realexperiment gewonnenen Diagramme mit denen durch die Methode der kleinen Schritte gewonnenen. Beurteilen Sie die Eignung der Kleinschrittmethode zur Modellierung der Fallbewegung des Papierkegels.

g) Ermitteln Sie aus den durch das Experiment gewonnenen Daten den Luftwiderstandsbeiwert c_w Ihres Papierkegels und vergleichen Sie ihn mit dem gegebenen Wert.

2 \ a) Interpretieren Sie die Diagramme in B1, welche die Kraft und Bewegungsgrößen des freien Falls eines Fallschirmspringers aus 3000 m Höhe zeigen, der seinen Fallschirm noch nicht geöffnet hat.

b) Eine neue Situation: Der Fallschirmspringer öffnet zum Zeitpunkt $t = 30$ s seinen Fallschirm. Dadurch vergrößert sich zunächst die Luftreibungskraft F_L, bis sich danach wieder ein Kräftegleichgewicht einstellt.
Übernehmen Sie die Diagramme von B1 in Ihre Aufzeichnungen und skizzieren Sie ihren Verlauf, nachdem sich der Fallschirm geöffnet hat.



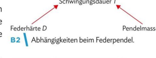
B1 Aus dem Modell lassen sich Erkenntnisse über die Realität gewinnen.

Lernen am Modell – Erkenntnisse aus der Simulation

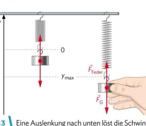
Es wurde bisher deutlich, dass die Methode der kleinen Schritte geeignet ist, Bewegungen und physikalische Systeme zu modellieren, also in einem rechnerischen Modell abzubilden. Damit lassen sich dann auch Vorhersagen über die physikalischen Systeme treffen. Am Beispiel der Federschwingungen untersuchen wir im Folgenden allein mithilfe der numerischen Simulation, wie die Wahl verschiedener Parameter die Schwingungsdauer beeinflusst.

Für eine beliebige Position y der Pendelmasse gilt nach Kap. 4 das lineare Kraftgesetz: $F = -D \cdot y$.

Da auch hier die Kraft nicht konstant ist, sondern vom Ort abhängt, eignet sich die Methode der kleinen Schritte sehr gut, den Verlauf der Bewegung zu berechnen. In Kap. 4.3 wurde bereits experimentell untersucht, welchen Einfluss die Parameter D und m auf die Periodendauer besitzen. Jetzt soll die Methode der kleinen Schritte zeigen, ob auch sie in der Lage ist, die Einflüsse korrekt vorherzusagen.



B2 Abhängigkeiten beim Federpendel.



B3 Eine Auslenkung nach unten löst die Schwingung aus.

Unter diesem Mediencode können Sie die zugehörige Tabellenkalkulations-Datei herunterladen:

MC 67051-53

Startbedingungen und Rechenvorschriften

Für ein Massestück an einer Schraubenfeder sind Beispielwerte in B4 aufgeführt.

Die Startauslenkung erfolgt nach unten, in positive y-Richtung. Die rücktreibende Kraft der Feder ist nach oben gerichtet und daher am Anfang negativ. Aus dem Kraftgesetz ergeben sich folgende Rechenvorschriften für die Methode der kleinen Schritte:

$$t_{neu} = t_{alt} + \Delta t$$
$$F_{neu} = -D \cdot y_{alt}$$
$$a_{neu} = \frac{F_{neu}}{m}$$
$$v_{neu} = v_{alt} + \Delta v \quad \text{mit} \quad \Delta v = a_{neu} \cdot \Delta t$$
$$y_{neu} = y_{alt} + \Delta y \quad \text{mit} \quad \Delta y = v_{neu} \cdot \Delta t$$

Nach der Umbenennung der Zellen, die Konstanten enthalten, lassen sich die Kraft und die Bewegungsgrößen gemäß der Rechenvorschriften errechnen (vgl. B6).

	A	B	C	D
1	**Harmonische Schwingung**			
2	**Anfangswerte**			
3	Federhärte	D = 2,2		N/m
4	Schwungmasse	m = 0,085		kg
5	Startauslenkung	y_0 = 0,3		m
6	Startgeschwindigkeit	v_0 = 0		m/s
7	Startzeit	t_0 = 0		s
8	Zeitintervall	dt = 0,02		s

B4 Startbedingungen der harmonischen Schwingung.

Vereinfachende Annahmen
t_neu = t_alt + **dt**
F_neu = **-D** * y_alt
a_neu = F_neu/**m**
v_neu = v_alt + a_neu * **dt**
y_neu = y_alt + v_neu * **dt**

B5 Einzeilige Darstellung in der Tabelle. Die fett gedruckten Variablen sind Konstanten.

	A	B	C	D	E
10	t in s	F in N	a in m/s²	v in m/s	y in m
11	=t_0	=-D*y_0	=B11/m	=v_0	=y_0
12	=A11+dt	=-D*E11	=B12/m	=D11+C12*dt	=E11+D12*dt
13	=A12+dt	=-D*E12	=B13/m	=D12+C13*dt	=E12+D13*dt
14	=A13+dt	=-D*E13	=B14/m	=D13+C14*dt	=E13+D14*dt

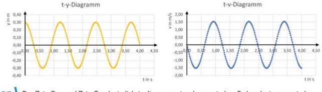
	A	B	C	D	E
10	t in s	F in N	a in m/s²	v in m/s	y in m
11	0,00	-0,66	-7,76	0,00	0,30
12	0,02	-0,66	-7,76	-0,16	0,30
13	0,04	-0,65	-7,68	-0,31	0,29
14	0,06	-0,64	-7,52	-0,46	0,28

B6 Die Formelansicht und Zahlenansicht der ersten vier Zeilen.



Wenn man sich die Diagramme bis zum Zeitpunkt $t = 4{,}0$ s ansieht, fällt auf, dass sich die Bewegungsgrößen periodisch ändern (vgl. B7). Die Methode der kleinen Schritte führt also direkt zur Erkenntnis: die Diagramme der Bewegungsgrößen sind sinusartig!

Unter *Formeln* → *Namensmanager* können bereits vorgenommene Zellumbenennungen gelöscht oder geändert werden.

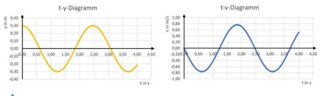


B7 \ Das Zeit-Ort- und Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm einer harmonischen Federschwingung mit den Startbedingungen aus B4 ($D = 2{,}2\,\frac{N}{m}$ und $m = 0{,}085$ kg).

Veränderung der Parameter

Ändert man die Werte für die Federhärte D und die Pendelmasse m, ergeben sich andere Bewegungsdiagramme (vgl. B8).

Eine weitere Stellschraube in der Modellierung ist die Variation des Zeitintervalls Δt. Damit lässt sich die Genauigkeit der Vorhersage verbessern; zulasten einer größeren Datenmenge.



B8 \ Das Zeit-Ort- und Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm für eine Schwingung mit weicherer Feder und größerer Pendelmasse ($D = 1{,}1\,\frac{N}{m}$ und $m = 0{,}17$ kg).

Wie man sieht, hat die Wahl der Parameter einen Einfluss auf die Periodendauer der Schwingung. Mithilfe der Methode der kleinen Schritte kommen wir so zu der Erkenntnis, wie die Periodendauer von D und m abhängt. Diese Erkenntnis haben wir zwar auch schon auf andere Weise gewonnen (vgl. Kap. 4), doch ist das nicht auf jedem Gebiet der Physik möglich, wie Kap. 10.5 zeigt.

Arbeitsaufträge

1 \ a) Führen Sie die Methode der kleinen Schritte für die Schwingung eines Federpendels durch. Starten Sie mit den Werten aus B4. Erstellen Sie die t-v- und t-y-Diagramme der Bewegung und ermitteln Sie – aus den Diagrammen oder aus der Tabelle – die Periodendauer T der Schwingung.

b) Variieren Sie nun *nacheinander* zunächst die Werte für die Federhärte D und dann die Pendelmasse m und ermitteln Sie jeweils die Periodendauer T, die sich dabei einstellt. Legen Sie dazu passende Wertetabellen an (Spalten: D, m, T). Bilden Sie mindestens zehn Kombinationen von D und m. Formulieren Sie Ihre Beobachtungen in Je-Desto-Aussagen (vgl. Methode S. 221).

c) Errechnen Sie anhand der Wertetabellen aus b) den Quotienten $\frac{m}{D}$ in einer eigenen Spalte. Zeichnen Sie anschließend Diagramme, in denen der Quotient $\frac{m}{D}$ auf der x-Achse und die Periodendauer T auf der y-Achse aufgetragen wird.

d) Fügen Sie im Diagramm eine Trendlinie hinzu und wählen Sie eine geeignete *Option* für die Trendlinie. Lassen Sie sich die Formel im Diagramm anzeigen. Nun haben Sie mithilfe einer numerischen Simulation einen mathematischen Zusammenhang zwischen T und $\frac{m}{D}$ entwickelt. Entwickeln Sie Möglichkeiten, um mithilfe der Simulation noch näher an die Formel zu gelangen: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$ (vgl. Kap. 4).

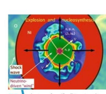
Rocket Science



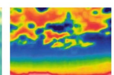
B1 Während eine Rakete Treibstoff verbrennt, verliert sie fortwährend Masse, sodass die Beschleunigung nichtkonstant ist. Außerdem müssen nicht-konstante Reibungskräfte berücksichtigt werden: Ein Fall für die Methode der kleinen Schritte.

Numerische Näherungsverfahren wie die Methode der kleinen Schritte spielen in der Physik, anderen Naturwissenschaften und im Ingenieurswesen eine wichtige Rolle. Viele Probleme haben eine mathematische Struktur, für die es keine Lösungen durch analytische Verfahren gibt oder aufgrund ihrer Größe und Komplexität nicht gefunden werden können. Durch numerische Verfahren lassen sich jedoch mit deutlich geringerem Zeit- und Rechenaufwand Näherungslösungen finden. Hochleistungsrechner und neue Rechnerarchitekturen wie Rechnercluster oder Grid-Computing erweitern die Einsatzmöglichkeiten numerischer Verfahren. In den folgenden Abbildungen sind einige ausgewählte Beispiele dargestellt.

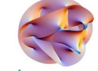
B2 Nur einige Zeitschriften, die sich ausschließlich mit numerischen Methoden in der Physik beschäftigen.



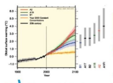
B3 **Astrophysik:** Dies ist die Simulation einer nach außen gerichteten, blasenwerfenden Explosionswelle im Kern eines kollabierenden Sterns bei einer Supernova. Eine große Zahl von Neutrinos entstand zuvor durch Elektroneneinfang von Protonen im Atomkern.



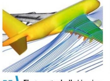
B4 **Gas- und Hydrodynamik:** Wärmebilder können auch modelliert werden, um so den Eintritt von Objekten in die Erdatmosphäre zu simulieren. Mit diesen Daten lassen sich Konstruktionsoptimierungen bei Raumfahrzeugen vornehmen.



B5 **Stringtheorie:** Calabi-Yau-Mannigfalten sind numerische Modelle, mit denen man nach dem Einrollen von Extradimensionen eine realistische Beschreibung der Elementarteilchen in den beobachtbaren vier Dimensionen (Raum und Zeit) erhalten möchte.



B6 **Klimawandel:** Es gibt auch Konkurrenz zwischen numerischen Modellen: Welches Modell kann die zeitliche Entwicklung der Realität am besten vorhersagen? Die abgebildeten Klimawandelmodellen unterscheiden sich darin, wie stark die globale Erwärmung ausfällt.



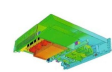
B7 **Flugzeugtechnik:** Um den Strömungsabriss an Tragflächen zu verhindern, werden durch numerische Modelle „Winglets“ entwickelt, mithilfe derer Flugzeugingenieure energie- und kostenoptimierte Tragflächen konstruieren können.



B8 **Quantenchemie:** Quantenmechanische Betrachtungen langkettiger Moleküle lassen sich nur numerisch durchführen. Bei der Medikamentenforschung etwa hilft Multiscale Modeling bei der Untersuchung der Bindung von Liganden an ein Zielprotein.



B9 \ **Robotik:** In dieser Simulation wird ein zweibeiniger Laufroboter als eingeschränkt bewegungsfähiges System behandelt, das mit einer nichtidealen Umgebung interagieren muss. Ziel ist es, die Roboterbewegungen für reale Umgebungen zu optimieren.



B10 \ **Elektrotechnik:** Simulationen von Anwendungen in der Elektrotechnik dienen Ingenieuren bei der Entwicklung optimierter Bauelemente. Dadurch werden die Material- und Energieeffizienz gesteigert, bei zugleich erhöhter Ausfallsicherheit.

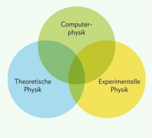


B11 \ **Teilchenphysik:** Bevor ein Teilchenbeschleuniger gebaut wird, dienen viele Simulationen der Entwicklung von Theorien und Vorhersagen, die anschließend experimentell überprüft werden. Im Bild sieht man die Simulation von Teilchenereignissen am LHC des CERN.

Methode

Experimente am Computer

Ungefähr in den 1920er Jahren entwickelte sich neben der bislang fast ausschließlich durch Experimente gestützten Physik ein neuer Zweig, die theoretische Physik. Die zunehmende mathematische Komplexität physikalischer Theorien, etwa in der Relativitätstheorie, brauchte Fachleute, die sich ausschließlich auf der theoretischen Ebene mit Problemen befasste. Mit der Quantenphysik schritt die Bedeutung der theoretischen Physik voran. Um etwa 1950 kam als dritter Zweig die Computerphysik hinzu. Sie steht in Austausch sowohl mit der theoretischen als auch der experimentellen Physik. Simulationen bilden dabei ein gesamtes System mikroskopisch bis auf die Ebene einzelner Teilchen ab, typisch bei Vielteilchensystemen. Numerische Verfahren geben Näherungslösungen für mathematische Gleichungen an, die sich aufgrund ihrer Komplexität nicht mehr analytisch lösen lassen, wie etwa bei chaotischen Systemen. Schlussendlich wird bei der Datenanalyse und Visualisierung ebenfalls auf numerische Methoden zurückgegriffen, um sowohl experimentelle Daten als auch Simulationsdaten zu interpretieren und graphisch aufzubereiten, wie etwa in der theoretischen und experimentellen Teilchenphysik.



Arbeitsaufträge

1 \ Wählen Sie eines der vorgestellten Beispiele von B3 - B11 aus und verschaffen Sie sich in verschiedenen Quellen einen Überblick darüber. Hinweis: Wenn Sie das Suchwort „numerisch" oder „numerical" ergänzen, finden Sie schnell hilfreiche Ergebnisse.
Bereiten Sie anschließend Ihre Informationen in digitaler Form auf. Gehen Sie dabei allgemein auf die Bedeutung numerischer Verfahren ein und heben Sie die Relevanz der Methode der kleinen Schritte bei Ihrem gewählten Beispiel hervor.

2 \ Wählen Sie eine der folgenden Thesen aus:
- *„Simulationen sind besser als Experimente. Ihnen kann man mehr vertrauen."*
- *„Man kann Programmierer sein, ohne Physiker zu sein. Aber man kann kein Physiker sein, ohne Programmierer zu sein."*
- *„Im Grunde brauchen alle Naturwissenschaften die Physik. Letztlich ist alles Physik."*

Formulieren eine schriftliche Stellungnahme oder entwickeln Sie gemeinsam mit einem Mitschüler/einer Mitschülerin einen schriftlichen Dialog über die These.

11 Photovoltaik

Versuche und Materialien zu Kapitel 11.2 und 11.3

M1 Lernaufgabe: Funktionsweise eines Solarmoduls und Energiespeichers

Photovoltaikanlagen zählen zu den regenerativen Energiequellen und sind auf vielen Häuserdächern angebracht. Die benötigte elektrische Energie für den Haushalt lässt sich dadurch (zum Teil) direkt am Haus erzeugen. Eine Herausforderung stellt dabei noch die verlustarme Speicherung der Sonnenenergie für Zeiten eines höheren Energiebedarfs bei wenig Lichtenergie (in der Nacht, bei Regen...) dar. In Solarzellen, die aus Halbleitermaterialien hergestellt sind, werden durch die Lichteinstrahlung positive von negativen Ladungen getrennt. Solange die Lichteinstrahlung anhält, kann dadurch ein elektrischer Strom fließen, der direkt nutzbar ist. Wird die Lichteinstrahlung unterbrochen, so kombinieren die negativen und positiven Ladungen miteinander, es kann kein Strom mehr fließen.

Diesem Problem nahmen sich Forscherinnen und Forscher der Suzhou University of Science and Technology an. Sie entwickelten ein spezielles Nanomaterial, das nicht nur elektrische Energie generieren, sondern aufgrund des Effekts der „aufladbaren Photoleitfähigkeit" auch speichern kann. Die neu entwickelte Solarzelle verwendet eine Kombination aus einer 40 nm dünnen Wolframselenidschicht und einem Kristall aus Strontiumtitanat. Auch bei dieser Solarzelle werden durch Lichteinstrahlung positive von negativen Ladungen getrennt, was zu einem Stromfluss führt. Wird die Lichtzufuhr unterbrochen, bleiben allerdings positive und negative Ladungen weiterhin getrennt. Die so aufgeladene Solarzelle kann als Batterie genutzt werden, durch das Anlegen einer äußeren Spannung konnte auch nach mehreren Tagen noch ein Stromfluss erzeugt werden. Auch wenn der Effekt nicht im großen Maßstab angewendet werden kann, könnte er für die durchgängige Stromversorgung von Sensoren bei Tag und Nacht effektiv genutzt werden.



Arbeitsauftrag

a) In der 8. Jahrgangsstufe haben Sie bereits die Funktionsweise von Solarzellen und Solarmodulen kennen gelernt. Rufen Sie sich diese Erkenntnisse noch einmal ins Gedächtnis. Erstellen Sie dafür ein Übersichtsblatt, das die wichtigsten Ergebnisse übersichtlich zusammenfasst. Gehen Sie auf die folgenden Inhalte ein:
   - Spannung und Stromstärke einer Solarzelle bei unterschiedlicher Beleuchtung / Abschattung
   - Zusammenschaltung von Solarzellen zu Solarmodulen
   - Kennlinie einer Solarzelle
   - Aufbau einer Solarzelle

b) Informationen über die neuartige Art der Energiespeicher werden u. a. in Fachzeitschriften diskutiert (Beispiel: siehe Mediencode). Bereiten Sie anhand der Informationen aus einem solchen Artikel ein Interview vor, das Sie mit dem Autor führen könnten. Stellen Sie dabei mindestens 3 kritische, fachliche aber auch gesellschaftsrelevante ökonomische Fragen.

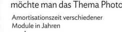
MC 67051-54

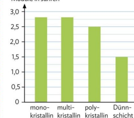
c) Beantworten Sie Ihre Fragen für sich selbst.

d) Diskutieren Sie eine Auswahl der Interviewfragen im Klassenverband.

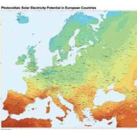
▶ M2 Lernaufgabe: Energiebilanz der Verwendung von Solarzellen

Bei der Diskussion über den Nutzen und Schaden von Photovoltaikanlagen spielen die Materialien und die Herstellung von Solarmodulen eine große Rolle. Ein wichtiger Maßstab ist hierbei die „energetische Amortisationszeit“. Diese gibt den Zeitraum an, in dem die Photovoltaikanlage betrieben werden muss, um so viel Strom zu erzeugen, wie für die Herstellung der Photovoltaikanlage benötigt wurde. Erst ab diesem Zeitpunkt hat man eine positive Energiebilanz. Faktoren wie der Strommix, der zur Produktion verwendet wurde, sowie die Gewinnung der Rohmaterialien wie Silizium müssen gesondert beachtet werden. Auch über die Entsorgung der nicht mehr nutzbaren Solarzellen muss man sich Gedanken machen, möchte man das Thema Photovoltaik vollumfänglich betrachten.





Die Entwicklung hin zu regenerativen Energieformen hat in den vergangenen Jahren zu großen technischen Fortschritten geführt. Je nach Typ der Photovoltaikanlage, spricht man heute von energetischen Amortisationszeiten von gut einem bis knapp 3 Jahren im privaten Gebrauch; im industriellen Bereich sind diese Zeiten noch etwas kürzer.



In Deutschland stammen (Stand 2022) bereits mehr als 21 Prozent des Strommixes aus Photovoltaikanlagen. Diese Entwicklung ist insbesondere auf den Privatbereich zurückzuführen, da die Anbringung der Anlagen auf den Dächern relativ unproblematisch und vor allem auch meist finanziell lukrativ ist: Die so erzeugte Energie kann nicht nur im eigenen Haushalt genutzt, sondern auch weiterverkauft und in das Stromnetz eingespeist werden.

Auch geographische Aspekte sind bei der Frage nach der Energiebilanz von Photovoltaikanlagen zu berücksichtigen. Der Wirkungsgrad der Module hängt nicht nur von der Art der verwendeten Module (siehe Diagramm oben) ab, sondern ebenso von Faktoren wie dem Aufstellort oder der nutzbaren Globalstrahlung vor Ort. Baut man zwei typgleiche Photovoltaikanlagen in Finnland und Griechenland auf, so wird in Griechenland wesentlich schneller eine positive Energiebilanz erreicht als in Finnland (vgl. Abbildung).

Hinweis: Unter Globalstrahlung versteht man die gesamte an der Erdoberfläche auftreffende Solarstrahlung gemessen in $\frac{W}{m^2}$.

Arbeitsauftrag

Im Internet findet man viele „Amortisationsrechner für Photovoltaikanlagen“. (Mögliche Suchbegriffe: „kostenloser Solarstrom check“). Diese zielen jedoch nicht rein auf die Energiebilanz zwischen der Herstellung/Entsorgung und der Stromentnahme.

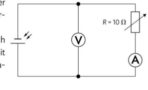
a) Analysieren sie den Unterschied zwischen der energetischen Amortisation und der in den Rechnern berechneten Amortisation.
b) Stellen sie weitere Faktoren heraus, die in den betreffenden Überlegungen berücksichtigt wurden, und die Faktoren, die dagegen vernachlässigt wurden. Gehen sie zusätzlich auf Gemeinsamkeiten ein.
c) Beurteilen Sie die Analyse, die der von Ihnen genutzte Amortisationsrechner durchgeführt hat.
d) Fertigen sie einen kurzen Zeitungsartikel zum Thema „Photovoltaik – Chancen und Gefahren unserer Zeit“ an. Gehen sie dabei kritisch auf einen der folgenden Aspekte ein:
   - Herstellung von Solarmodulen
   - Entsorgung von Solarmodulen
   - Wirkung von Solarmodulen auf Umwelt und Gesellschaft

Schülerexperiment: Physikalische Eigenschaften von Solarzellen

V1 *U-I*-Kennlinie und elektrische Leistung einer Solarzelle

Ziel und Aufbau:

In diesem Experiment sollen die *U-I*-Kennlinie und die Leistung einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke untersucht werden. Um die Bestrahlungsstärke zu variieren, wird der Abstand der Solarzelle zur Lampe variiert. Am einfachsten geht das, wenn Lampe und Solarzelle auf einer Schiene angebracht werden. Die Spannung *U* und Stromstärke *I* sollten für die Erstellung einer *U-I*-Kennlinie direkt an der Solarzelle ausgelesen werden können.



Hinweis: Dieser Versuch lässt sich auch sehr gut mit externen Sensoren und Tablets auswerten!

Beschreibung:

Bauen Sie den Versuch so auf, dass die Solarzelle frontal und vollständig beleuchtet wird. Regeln Sie die Lichtintensität, indem Sie die Lampe fest auf der Schiene montieren und die Solarzelle von ihr wegschieben. Der Versuch soll mit mindestens drei unterschiedlichen Lichtintensitäten durchgeführt werden. Wählen Sie den Abstand x zwischen der Experimentierlampe und der Solarzelle dabei mindestens so, dass die Solarzelle vollständig beleuchtet ist. Achten Sie darauf, bei allen drei Abständen diesen Mindestabstand nicht zu unterschreiten.

Ergänzen Sie das Voltmeter, das Amperemeter und das Potentiometer, wie in der Schaltskizze angegeben. Durch das Potentiometer kann die abgegriffene Spannung zur Erstellung des *U-I*-Diagramms verändert werden.

Um eine Erwärmung der Solarzelle und damit eine ungenaue Kennlinie zu vermeiden, muss der Versuch zügig durchgeführt werden. Die Lampe sollte zudem erst kurz vor Messbeginn eingeschaltet werden.

Weitere Hinweise:

Sie erleichtern sich die Arbeit, wenn Sie den Stoff der achten Klasse über die Kennlinien von Solarzellen wiederholen. Dabei sollten Sie sich die Begriffe „Leerlaufspannung“ und „Kurzschlussstromstärke“ in Erinnerung rufen.



Gehen Sie sorgsam mit der Solarzelle um! Halten Sie spitze oder scharfe Gegenstände von ihr fern, um Kratzer zu vermeiden! Achten Sie darauf, dass die Solarzelle gut befestigt ist, wenn Sie sie auf der Schiene bewegen!

Arbeitsauftrag

a) Notieren Sie sich, welche Materialien Sie zur Durchführung des Versuchs benötigen. Zeichnen Sie den Experimentaufbau und den zugehörigen Schaltplan auf. Zur Kontrolle können Sie den Mediencode für die Materialliste MC 67051-55 nutzen.

b) Legen Sie Tabellen an, in denen Sie für mindestens drei verschiedene Lichtintensitäten geeignete *U-I*-Paare notieren. Die Lichtintensitäten können Sie anpassen, indem Sie den Abstand *x* zwischen Lampe und Solarzelle variieren. Den jeweiligen Abstand sollten Sie sich notieren.

c) Ergänzen Sie die Tabellen durch die jeweilige berechnete Leistung der Solarzelle ($P = U \cdot I$).

d) Bestimmen Sie anhand der Tabellen die Spannung, bei der die Leistung an der Solarzelle maximal wird. Dieser Punkt ist eine wichtige Kenngröße der Solarzelle und wird **Maximal Power Point (MPP)** genannt.

e) Zeichnen Sie die drei *U-I*-Diagramme in ein gemeinsames Koordinatensystem. Wählen Sie dafür einen geeigneten Maßstab.

f) Beschreiben Sie den Verlauf der Diagramme im Vergleich zwischen den verschiedenen Lichtintensitäten.

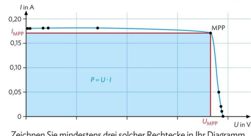
V2 Bedeutung des Maximal Power Point (MPP)

Der MPP (vgl. V1d)) lässt sich nicht nur berechnen, sondern auch aus dem *U*-*I*-Diagramm der Solarzelle graphisch bestimmen. Nutzen Sie dafür den gleichen Versuchsaufbau wie in V1. Ein Tabellenkalkulationsprogramm hilft bei der exakten Bestimmung des gesuchten Wertepaares.
Im Folgenden ist eine detaillierte Anleitung dargestellt, um den MPP der Solarzelle graphisch zu bestimmen:

① Bestimmen Sie die *U*-*I*-Kennlinie Ihrer Solarzelle, für Schritte von 0,05 V.

② Erstellen Sie das zugehörige *U*-*I*-Diagramm.

③ Die Leistung wird durch das Produkt aus Stromstärke und Spannung bestimmt. In unserem Diagramm wird dieses Produkt durch ein Rechteck, das von den Koordinatenachsen und einem Eckpunkt, der auf der Kennlinie liegt, veranschaulicht (siehe Skizze).



Zeichnen Sie mindestens drei solcher Rechtecke in Ihr Diagramm.

④ Schätzen Sie ab, welches der von Ihnen bestimmten Rechtecke den größten Flächeninhalt besitzt. Kontrollieren Sie Ihr Ergebnis durch die Berechnung der Flächeninhalte und bestimmen Sie so das Rechteck mit dem größten Flächeninhalt.

⑤ Übertragen Sie die *U*-*I*-Wertepaare in eine Tabelle und berechnen Sie jeweils die elektrische Leistung ($P = U \cdot I$).

Methode

Schlussfolgerungen aus Experimenten ziehen

In der Physik ist es sehr wichtig, Experimente zu nutzen, um technische Problemstellungen zu lösen oder zwischen mehreren Hypothesen für physikalische Phänomene zu entscheiden. Die Experimente sollten dabei möglichst einfach gestaltet sein, um keine störenden Effekte zu erhalten, die zu falschen Schlüssen führen können. Sie sollten anhand einer Anfangsthese (vgl. V2a) geplant werden. So lassen sich auch aus den beiden von Ihnen durchgeführten Experimenten Rückschlüsse auf grundlegende physikalische Eigenschaften von Solarzellen ziehen (vgl V2f)). Es wird dabei versucht, die Messergebnisse zu mathematisieren, z. B. in Form eines physikalischen Gesetzes oder zumindest einer Proportionalität etc.

Arbeitsauftrag

a) Formulieren Sie eine These, wie die *U*-*I*-Kennlinie und die elektrische Leistung einer Solarzelle von der Bestrahlungsstärke abhängen.

b) Führen Sie die einzelnen Schritte zur graphischen Bestimmung des MPP wie links beschrieben durch.

c) Erklären Sie anhand der durchgeführten Experimente den Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke bei gleichbleibender Bestrahlungsstärke.

d) Dehnen Sie ihre Beobachtungen auf die weiteren Versuche mit sich verändernder Bestrahlungsstärke aus.

e) Beziehen Sie nun auch die berechnete elektrische Leistung in Ihre Schlussfolgerungen mit ein.

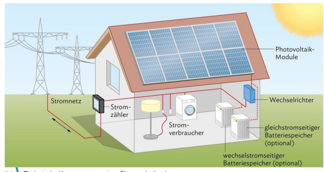
f) Formulieren Sie einen Satz bzw. mathematischen Term, der den Zusammenhang zwischen den Versuchsergebnissen und den erarbeiteten physikalischen Eigenschaften der Solarzelle darstellt.
Hilfestellung auf Seite 210-212

g) Kontrollieren Sie ihre These vom Beginn (V2a)) und passen Sie sie gegebenenfalls entsprechend ihrer Erkenntnisse an.

h) Beurteilen Sie den Nutzen einer Photovoltaikanlage in Deutschland im Sommer und im Winter. Berücksichtigen Sie dabei auch den Neigungswinkel und Abschattungseffekte.

Bestandteile einer Photovoltaikanlage

Solarzellen sind heutzutage in unserer Umgebung nicht mehr zu übersehen. Sie finden sich nicht nur auf vielen Dächern, sondern sind auch als Solarparks oder sogar im Meer angebracht, um elektrische Energie aus Sonnenenergie zu gewinnen.
Bevor der Strom aber aus der Steckdose entnommen werden kann, sind zunächst weitere technische Komponenten nötig.

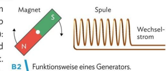


B1 Technische Komponenten einer Photovoltaikanlage.

Nachdem in den Photovoltaikzellen der Solarmodule Lichtenergie in elektrische Energie umgewandelt wurde, wird diese in den Wechselrichter eingespeist. Hier wird der in den Photovoltaik-Modulen erzeugte Gleichstrom in Wechselstrom umgewandelt. Außerdem wird mithilfe des Wechselrichters die bereitgestellte Spannung und Stromstärke geregelt. Einige Solaranlagen verfügen zusätzlich über optionale Batteriespeicher, so dass momentan nicht benötigte elektrische Energie gespeichert werden kann. Alternativ kann der elektrische Strom in das allgemeine Stromnetz eingespeist werden.

Funktionsweise eines Wechselrichters

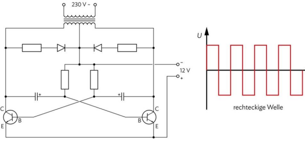
Die Erzeugung der Wechselspannung im Wechselrichter lässt sich auf das Prinzip des Generators zurückführen (vgl. B2): Durch ein sich änderndes Magnetfeld wird in einer Spule ein Induktionsstrom erzeugt. Zur Erzeugung des veränderlichen Magnetfeldes kann beispielsweise ein Magnet durch Gleichspannung mithilfe eines Gleichstrommotors, der auf der Drehachse sitzt, in eine Drehbewegung versetzt werden (der Gleichstrommotor ist in B2 nicht eingezeichnet). In der Spule, die vor dem Magneten aufgebaut ist, wird dann eine Wechselspannung induziert.



B2 Funktionsweise eines Generators.

Durch die Kombination der verwendeten Spule mit einer weiteren Spule, entsteht ein Transformator. Je nach der Kombination der Windungszahlen in der Primär- und Sekundärspule, lassen sich unterschiedliche Spannungen abgreifen. Als Ergebnis erhalten wir aus der eingespeisten Gleichspannung eine Wechselspannung, die den gewünschten Spannungswert bereitstellt.

Für den Bau eines Wechselrichters verwendet man heutzutage üblicherweise Halbleiterbauelemente, die zusätzliche Möglichkeiten in der Anwendung schaffen. Durch die Grundeigenschaft von Dioden, nur eine Durchlassrichtung von Strom aufzuweisen, können Wechselrichter kompakt und Variantenreich gebaut werden. Die Energieverluste bei der Umwandlung von Gleich- in Wechselspannung sind dabei vergleichsweise gering, der Wirkungsgrad liegt im Bereich von 92 - 97%.



B3 \ Beispielhaftes Schaltbild eines Wechselrichters und das so erzeugte Spannungssignal.

In B3 ist der Schaltplan zum Aufbau eines sehr einfachen Rechteckwechselrichters mit einer astabilen Multivibratorschaltung zum Ansteuern der Primärspule des Transformators dargestellt. Dieser Wechselrichter erzeugt kein sinusförmiges Ausgangssignal und eignet sich nur für rein ohmsche Lasten wie Glühlampen oder elektrische Heizungen.

Ein Wechselrichter wandelt den bei der Photovoltaikanlage erzeugten Gleichstrom in den für das Stromnetz benötigten Wechselstrom um.

MPP-Tracker

Wie im Schülerexperiment zur Erzeugung der Kennlinien eines Solarmoduls bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken zu sehen ist, liefern Photovoltaikmodule nicht permanent die gleiche Leistung. Durch die Wetterbedingungen verändern sich auch die Lichtintensität und die Temperatur der Module und damit die abzugreifende Spannung. Um dennoch möglichst effizient Solarmodule verwenden zu können, sind in neueren Solarzellen oder den Wechselrichtern sogenannte MPP-Tracker (Maximal Power Point Tracker) eingebaut. Diese kleinen Mikroprozessoren nutzen einen Algorithmus, um den Innenwiderstand des Trackers auf die gelieferte Spannung anzupassen. Ziel ist es, für die jeweils vorliegenden Bedingungen den Maximal Power-Point zu errechnen (Maximum der Leistung, also des Produkts aus Spannung und Stromstärke) und den Widerstand entsprechend zu justieren, damit die Solarmodule nach Möglichkeit am MPP operieren können. Somit kann die Effizienz der Photovoltaikanlage gesteigert werden und Probleme wie die Verschattung von Solarmodulen fallen weniger ins Gewicht.

Arbeitsaufträge

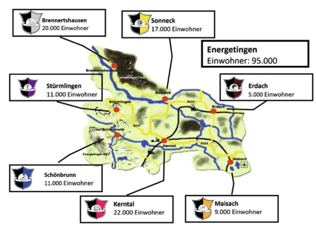
1 \ Erläutern Sie anhand von B1 die grundlegende Funktionsweise der Photovoltaikanlage. Gehen Sie dabei vor allem auf den Wechselrichter und dessen Funktionsweise ein.

2 \ Recherchieren Sie nach Anwendungsgebieten von Wechselrichtern. Erklären Sie für ein Anwendungsbeispiel Ihrer Wahl die Funktion des Wechselrichters in diesem Zusammenhang.

3 \ Schätzen Sie ab, ob sich eine Balkon-Photovoltaikanlage, auch Balkonkraftwerk genannt, für Sie lohnen könnte. Gehen Sie davon aus, dass der Balkon nach Süden orientiert ist und Sie über ausreichend handwerkliches Geschick verfügen (bzw. Ihnen jemand helfen kann). Schlagen Sie einen passenden Neigungswinkel der Solarzellen vor.

▶ M1 Lernaufgabe: Die Gemeinde Sonneck in Energetingen – ein Planspiel

Als eine der regenerativen Energiequellen bietet sich die Photovoltaik zur industriellen, aber auch zur privaten Nutzung an. Das Planspiel „Energetingen" schafft einen Rahmen, sich mit verschiedenen regenerativen Energiequellen zu befassen und Vor- und Nachteile sowie die konkrete Umsetzbarkeit zu diskutieren. Das Planspiel wurde von Maximilian Knogler und Klaus Masch zusammen mit der TU München entwickelt. Nähere Informationen und Materialien dazu finden Sie unter www.energetingen.de. Im Folgenden soll sich hier nur auf den Bau des Solarparks in der Gemeinde Sonneck konzentriert werden.



Warum sollte man ein Planspiel durchführen?

Die Antwort könnte etwa so lauten: Wenn Umweltschützer, Stromproduzenten, Ingenieure und Bürgervertreter an einem Tisch sitzen und Zukunftskonzepte diskutieren, vermutet man dieses Szenario im Stadtrat, im Gemeinderat, auf Wirtschaftsgipfeln und anderen politisch wegweisenden Kongressen. Diese diskutieren und werten die verschiedenen Auswirkungen der Versorgung der Bevölkerung mit elektrischem Strom auf verschiedene Interessensgruppen aus. Günstigen Strom möchte jeder nutzen, ein Windkraftwerk oder eine Müllverbrennungsanlage in der direkten Nachbarschaft ruft dagegen schnell Widerstand bei den Betroffenen hervor. Welche Abwägungen bei der Planung der Energieversorgung berücksichtigt werden müssen, kann anhand von Planspielen live erfahren und erlebt werden.

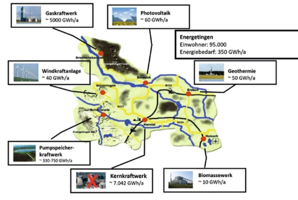
Wie wird das Planspiel durchgeführt?

Bekannte Konzepte wie das Planspiel Börse werden bei „Energetingen" auf die Entwicklung eines möglichst verträglichen Konzepts zur Energieversorgung übertragen. Schlüpfen Sie in die Rolle der Vertreter verschiedener Interessensgruppen und eignen Sie sich möglichst viel Hintergrundwissen an, um Ihre Interessen gegenüber anderen Expertengruppen möglichst gut zu positionieren. Ob Bürgermeister, Kraftwerksbetreiber oder regionaler Bauer: In der Gemeindekonferenz, die an die Planungsphase anschließt, finden Sie Kompromisse und überzeugen die anderen Teilnehmer von Ihren Argumenten. Finden Sie Unterstützer und grenzen Sie sich gegenüber Konkurrenten ab. Das Ziel der Konferenz ist es, ein Konzept für den Solarpark zu entwickeln, für das sich alle Beteiligten verantwortlich fühlen und in dem die Bedürfnisse aller Gruppen Gehör finden. Der Mediencode stellt Ihnen alle benötigten Materialien zur Verfügung und Ihre Lehrkraft wird Ihnen bei der Durchführung helfen!



MC 67051-56

Im vollständigen Planspiel soll über verschiedene Projekte, die in verschiedenen Orten geplant sind, entschieden werden. Expertengruppen aus allen Orten erstellen zunächst für ihr jeweiliges Projekt ein Meinungsbild, das dann im Gesamtplenum diskutiert wird.
Exemplarisch soll hier aber nur das Projekt „Sonneck: Mögliche Errichtung einer Photovoltaikanlage (Solarpark)" betrachtet werden. Folgende Ausgangssituation bietet die ersten Informationen:



Die Stadt Sonneck ist mit knapp 17 000 Einwohnern die drittgrößte Stadt im Landkreis Energetingen. Im Gewerbegebiet der Stadt haben sich einige Firmen und Handwerksbetriebe angesiedelt, doch insgesamt bestimmt ein ländlicher Charakter mit vielen landwirtschaftlichen Betrieben und Flächen das Landschaftsbild. Die Bürgerinnen und Bürger Sonnecks wohnen gerne hier und schätzen die Ursprünglichkeit der Gegend rund um die Stadt. Die schöne Lage und gute Verkehrsanbindung hat die Stadt in den letzten Jahren stark anwachsen lassen. Dies äußert sich nicht nur in fehlenden Bau- und Gewerbegebietsflächen, sondern auch in erhöhtem Energieverbrauch. Hier liegt das Problem: Die neue Gesetzeslage setzte der Atomenergie in Bayern ein Ende. Das Kernkraftwerk in Kerntal wurde bereits dauerhaft vom Netz genommen. Mit etwa 1800 Sonnenstunden pro Jahr ist Sonneck eine der sonnenreichsten Städte Deutschlands. Deshalb ist in Sonneck der Bau eines großen Solarparks geplant, für den die Umgebung der Stadt laut der Befürworter einen idealen Standort darstellt. Aufgrund fehlender Gewerbegebietsflächen sind zur Umsetzung des Projektes das Kaufen bzw. Pachten von etwa 170 ha Ackerflächen notwendig. Selbstverständlich sollen die Grundbesitzer dabei entsprechend vergütet werden. Der Solarpark, eine 65 MW Anlage, könnte durchaus bis zu 60 $\frac{GWh}{a}$ *Strom liefern. Damit könnten nicht nur die Stadt versorgt werden, sondern es stünden auch noch Energieüberschüsse zur Verfügung, die in das Netz des Landkreises eingespeist werden könnten.*
Das 150-200-Millionen Euro Projekt wäre so nicht nur eine Stütze der Energieversorgung des Landkreises Energetingen, sondern würde auch die Wirtschaft weiter ankurbeln und zusätzliche Arbeitsplätze in der Stadt schaffen. Deshalb hat der Solarpark in der Stadt eine Vielzahl an Befürwortern gefunden. Andererseits haben das Vorhaben selbst und die Umrüstungen im lokalen Stromnetz auch etliche Gegner auf den Plan gerufen. Diese befürchten aus zahlreichen Gründen negative Konsequenzen für die Bürgerinnen und Bürger der Stadt. So hat sich bereits eine Bürgerinitiative formiert, die das Projekt unbedingt verhindern will und immer eigene Aktionen startet. Alternativen wie die Anbringung der Solarmodule auf Dächern werden auch in die Diskussion gebracht.
Mit Spannung wird deshalb der Aufruf des Landrats aufgenommen, gemeinsam über die zukünftige Energieversorgung des Landkreises nachzudenken und zu diskutieren. Viele Beteiligte wappnen sich schon für die bevorstehende Gemeindekonferenz, auf der der geplante Solarpark noch einmal diskutiert werden soll und über deren Ergebnis auch der Landrat Rückmeldung erhalten wird. Dabei informieren sich die Bürgerinnen und Bürger intensiv über geplante Solaranlagen in Bayern und Deutschland, die ihrer Situation in Sonneck möglichst nahe kommen.

Methode

Rollenspiel – Kleine Tricks, wie Sie Ihre Rolle „leben“ können

Damit Sie besser in Ihre Rolle schlüpfen können, so wie es der Verlauf des Planspiels auf der Folgeseite 171 vorsieht, sollen Ihnen die folgenden Tipps helfen. Denken Sie daran, dass Sie wie ein Schauspieler nur eine Rolle spielen, und niemand von Ihnen denkt, Sie würden sich auch sonst so verhalten, wie es die Rolle vorgibt. Es geht also nicht darum, *cool rüberzukommen*, sondern die Rolle möglichst authentisch darzustellen. Diese kleinen Tricks können Ihnen dabei helfen und über den Mediencode gelangen Sie zu nützlichen Materialien, mit denen Sie sich besser in Ihre Rolle einfinden können. Viel Spaß beim Rollenspiel!



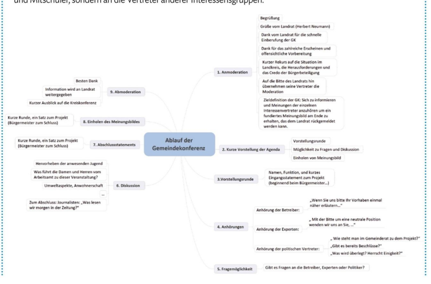
MC 67051-57

- Mit dem Anstecken der Rollenschilder sind Sie in der Rolle und leben sie bewusst.
- Sprechen Sie Sich immer mit dem Rollennamen an.
- Schulische und private Dinge (nächste Unterrichtsstunde, Hausaufgaben, …) werden in der Rolle ganz bewusst nicht angesprochen.
- Sprechen Sie von Sich auch öfter in der dritten Person. (z. B. „Als Vertreter des Kraftwerksbetreibers, denke ich …“)
- Zu besonderen Anlässen im Spiel (Konferenz) hilft es, wenn Sie sich rollengemäß kleiden.
- Sehen Sie bei den Anderen die Rolle vor Ihnen und nicht den Mitschüler oder die Lehrkraft!

Der Ablauf der abschließenden Gemeindekonferenz ist in der Mindmap unten dargestellt. Diese können Sie sich nochmal detaillierter über den Mediencode ansehen. In der Gemeindekonferenz, in der alle Vertreter der einzelnen Gruppen zu Wort kommen und der Bau des Solarparks diskutiert wird, sollen Sie Ihre jeweilige Rolle einnehmen (vgl. Methode oben). Tragen Sie dafür ein Namensschild, das Ihre Rolle angibt. Beachten Sie, dass Sie während der Konferenz in Ihrer Rolle bleiben. Entsprechend richten Sie sich nicht an Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler, sondern an die Vertreter anderer Interessensgruppen.



MC 67051-58



Die Konferenz könnte wie folgt dargestellt ablaufen:
1. Anmoderation
2. kurze Vorstellung der Agenda
3. kurze Vorstellrunde
4. Anhörungen der Betreiber, der Experten, der Politiker (recherchierte Fakten und Experimente sowie deren Auswirkungen auf das Thema einbeziehen!)
5. Fragemöglichkeit
6. Übergang zur Diskussion: Alle kommen zu Wort (Schlussfolgerungen aus den recherchierten Fakten und Experimenten als stichhaltige Argumente für die eigene oder die Meinung anderer Interessensgruppen nutzen!)
7. Abschlussrunde: Blitzlicht (kurze Zusammenfassung des eigenen Standpunktes)
8. Einholen des Meinungsbildes (per Handzeichen)
9. Abmoderation

Arbeitsauftrag

a) Jede Rolle wird in der Regel von mehreren Personen besetzt. Finden Sie sich Ihrer Rolle gemäß in Gruppen zusammen und stimmen Sie sich ab. Folgende Rollen stehen im Planspiel zur Verfügung:
Stadträte, Bürgermeister, Kraftwerksbetreiber, technische Experten, Journalisten, Heimatpfleger, Agentur für Arbeit, Umweltinitiativen, Jugendorganisationen von Parteien, Bauunternehmer, Bürgerinitiativen, Kraftwerksanrainer, Grundbesitzer.

b) Legen Sie innerhalb ihrer Gruppe die Punkte fest, die für Ihre Gruppe im Zusammenhang mit dem Projekt „Solarpark" die wichtigsten Interessen wiederspiegeln. Informieren sie sich dabei auch über die Charakteristika der Gruppe, die Sie vertreten. Die Moderatorinnen und Moderatoren werden in der Gesamtkonferenz das Gespräch leiten, sodass ein Gesamtüberblick über die Thematik sehr wichtig für diese Gruppe ist.

c) Recherchieren Sie nach Fakten und Daten, die für die Interessen Ihrer Gruppe sprechen. Konzentrieren Sie sich dabei auf Chancen und Herausforderungen des Baus eines Solarparks für Ihre Gruppe. Berücksichtigen Sie dabei auch Forschungsprojekte, Experimente und Statistiken, die zukunftsweisend sein könnten. Lassen Sie auch Ihre eigenen experimentellen Erfahrungen einfließen, die Sie beispielsweise bei den Schülerexperimenten gesammelt haben.

d) Fassen Sie Ihre Ergebnisse übersichtlich auf einer DIN A4-Seite zusammen.

e) Besprechen Sie im Klassenverband das Projekt „Solarpark" in den Ihnen zugeteilten Rollen (vgl. Ablaufsplan oben; Aufstellschilder: siehe Mediencode). Achten Sie dabei darauf, die Interessen Ihrer Gruppe zu vertreten, dabei aber ebenso die Argumentationen der anderen Rollen in Ihre Überlegungen mit einzubeziehen. Die gesammelten Fakten können Ihnen dabei helfen, Argumente der anderen Rollen zu unterstützen oder zu widerlegen.

MC 67051-59

f) Legen Sie nun Ihre Rollen wieder ab und reflektieren Sie den Verlauf der Gemeindekonferenz. Fassen Sie den Weg bis zur Entscheidungsfindung zusammen und bewerten Sie den bei der Konferenz gefallenen Entschluss. Fassen Sie abschließend zusammen, was Sie über das Thema „Energiegewinnung" bei dem Planspiel gelernt haben.



12 Außerunterrichtliche Aktivität

Angebote außerunterrichtlicher Aktivitäten

„Nicht für die Schule, sondern für das Leben lernen wir!“, postulierte schon Lucius Annaeus Seneca (ca. 4 v. Chr. – 65 n. Chr). Die Chance und Herausforderung, „das Leben“ in die Schule zu bringen, bietet oft die Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern wie Vereinen, Museen oder außerschulischen Lernorten. Um nachhaltig von außerunterrichtlichen Aktivitäten profitieren zu können, sollten insbesondere zwei Fragen im Vorfeld besprochen werden: Was möchten wir gemeinsam unternehmen und mit welchen Zielen führen wir die gemeinsame Aktivität durch?



B1 Büste des römischen Philosophen Annaeus Seneca.

Auswahl der Aktivität

Die Auswahl der außerunterrichtlichen Aktivität trifft die Lehrkraft im Einvernehmen mit der Klasse. Auf den folgenden Seiten finden Sie verschiedene Vorschläge für mögliche Aktivitäten; natürlich können Sie aber auch eigene Ideen im Klassenverbund entwickeln!



B2 Die Art der Aktivität sollte gemeinsam beschlossen werden.

Bei der Entscheidungsfindung zur Auswahl der Aktivität können folgende Fragen hilfreich sein:

- Welche Thematik interessiert mich / meine Klassenkameraden am meisten?
- Wo finde ich „Experten“ für eine Aktivität zu diesem Thema?
- In welchem Format (Museum, Vortrag, Exkursion, ...) soll die Aktivität durchgeführt werden?
- Wie und zu welchem Zeitpunkt passt die außerunterrichtliche Aktivität gut zum Unterrichtsinhalt im Fach Physik meiner Jahrgangsstufe?
- Welche aktuellen Themen/ Ereignisse können aufgegriffen werden?
- Wie sieht das Kosten-Nutzen-Verhältnis, auch unter Berücksichtigung des Zeitrahmens, aus?

Die Angebote von außerschulischen Lernorten sind ebenso reichhaltig und umfangreich, wie die Lernorte selbst. Oft kann ein Angebot ein Aufhänger dafür sein, ein gemeinsames, genau auf die Bedürfnisse der Teilnehmer abgestimmtes Projekt zu entwickeln. In der Planungsphase eines Projekts mit außerschulischen Lernorten lohnt es sich daher, verschiedene Angebote zu sichten. Spricht z. B. ein Programm, das die allgemeine Öffentlichkeit über den Stand der Forschung in einem bestimmten Bereich informieren will, eine Projektgruppe an, so lohnt es sich, mit den Verantwortlichen auszuloten, inwieweit dies die Basis für eine außerunterrichtliche Aktivität bilden kann. Hierbei sind die Interessen und das Vorwissen beider Seiten zu berücksichtigen. Am einfachsten gelingt dies, wenn ein Anbieter verschiedene Formate bedient.

Ziel der Aktivität

Den größten Nutzen aus der Aktivität können Sie dann ziehen, wenn Sie sie mit bestimmten Zielen vor Augen durchführen. So können Sie sich bei der Aktivität entsprechend der Zielsetzung verhalten, indem Sie gezielt Fragen stellen, sich Notizen machen oder Fotos und Videos anfertigen. Grundsätzlich sollten Sie sich immer zuerst die Frage stellen: Wie entnehme ich an einem außerschulischen Lernort die relevanten Informationen?
Im Folgenden werden sieben Zielsetzungen vorgestellt, die Sie sich für die außerunterrichtliche Aktivität setzen können. Beachten Sie dabei die Hinweise, die Ihnen beim Erreichen der Ziele helfen sollen!

Ziel 1: Diskussionen oder Vorträge analysieren

Wenn Sie sich einen Vortrag oder eine Diskussion zu einem bestimmten Thema anhören, sollten Sie sich grundsätzlich Notizen dazu machen, um die wesentlichen fachlichen Inhalte kurz zusammenzufassen. Etwas anspruchsvoller wird es, wenn Sie etwas mehr in die Tiefe gehen und die Argumentationsmuster des Vortragenden analysieren wollen. Beantworten Sie dafür unter anderem folgende Fragen:



B3 \ Eine Sprecherin bei einem Vortrag.

- Was ist die Interessenslage des Vortragenden? Welches Ziel möchte er erreichen?
- Was sind die Hauptargumente?
- In welche Abschnitte lässt sich der Vortrag unterteilen?
- Welche rhetorischen Mittel werden verwendet?

Ziel 2: Bewertungen kontroverser Themen reflektieren

Bei Vorträgen oder Veröffentlichungen zu kontrovers diskutierten Themen, wie dem Klimawandel oder der Kernenergie, ist es besonders wichtig, die durchgeführte Bewertung genau zu betrachten. Ähnlich wie bei Ziel 1 sollten Sie sich die Hauptargumente und die Interessenslage des Autors bzw. der Autorin verdeutlichen. Analysieren Sie anschließend, wie gut die Argumente belegbar sind und inwiefern sie auf wissenschaftlichen Fakten basieren.



B4 \ Karikatur zum Klimawandel.
© Gerhard Mester, 2022

Ziel 3: Wissenschaftliche Verantwortung reflektieren

Insbesondere im Zusammenhang mit kontroversen Themen, die Auswirkungen auf das Leben vieler Menschen haben können, ist auch immer die Verantwortung der Wissenschaft zu betrachten. Auf wissenschaftliche Fakten muss aufmerksam gemacht werden, auch wenn diese „unbequem" sein mögen. Doch dürfen sich Wissenschaftler dabei auch in politische Entscheidungen einmischen? Diese Frage können Sie im Anschluss an die Aktivität in der Klasse diskutieren.

Ziel 4: Eine physikalische Stellungnahme formulieren

Um eine physikalisch fundierte Stellungnahme zu einem Thema aus einer Diskussion, Präsentation etc. zu formulieren, sollten insbesondere die vorgebrachten Argumente aus physikalischer Sicht genau analysiert werden. Dabei sollten immer auch zuverlässige Wissenschaftsquellen herangezogen und der eigene Standpunkt verdeutlicht werden. Dieser Standpunkt sollte dann auch für alle logisch nachvollziehbar sein. Sie müssen also auch die Zielgruppe berücksichtigen, an die Sie sich mit der Stellungnahme wenden. Weitere Details zum Formulieren einer adressatenbezogenen Stellungnahme können Sie in den Methoden auf S. 33 bzw. S. 100 nachlesen.

Ziel 5: Fachliche Informationen präsentieren

Die bei der Aktivität gesammelten Ergebnisse können Sie für andere (und natürlich auch für sich selbst!) in Form einer Präsentation oder eines Posters übersichtlich zusammenfassen (vgl. auch die Methode dazu auf S. 100). Überlegen Sie sich dafür gut, wem Sie die Informationen präsentieren wollen. Das Ganze muss dann entsprechend aufgearbeitet und für die Zielgruppe geeignet dargestellt werden. Auch hier sind wieder die Methoden zur adressatenbezogenen Stellungnahme zu berücksichtigen (vgl. S. 33 und S. 100).



B5 Präsentation in Form eines Posters.

Ziel 6: Wege der Erkenntnisgewinnung vergleichen

In den Naturwissenschaften kann die Erkenntnisgewinnung auf verschiedene Arten ablaufen. So können wissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten anhand von selbst durchgeführten Experimenten entdeckt werden, wie Sie es schon häufig selbst bei den Schülerexperimenten erlebt haben. Sie können die Informationen aber auch beispielsweise aus Vorträgen, Präsentationen oder Videos entnehmen. Die Möglichkeiten sind hier also sehr vielfältig. Bei der außerunterrichtlichen Aktivitäten begegnen Ihnen also vermutlich mehrere solcher Wege der Erkenntnisgewinnung, die Sie analysieren und vergleichen können.

Ziel 7: Relevanz von Erkenntnissen interpretieren

Die Erkenntnisse, die Sie gewinnen, können für verschiedene Bereiche auf verschiedene Arten relevant sein. Bei der Alltagsrelevanz können Sie oder Ihr direktes Umfeld die gewonnenen Erkenntnisse nutzen, um beispielsweise bestimmte Situationen auf Basis physikalischer Erkenntnisse besser beurteilen zu können. So haben Sie in Kapitel 9 aufgrund der erworbenen Erkenntnisse über die Energieversorgung einen Einergieeinsparvertrag abgeschlossen, der direkte Relevanz für Ihr Verhalten im Alltag hat. Andere wissenschaftliche Erkenntnisse haben vielleicht keine direkten Auswirkungen auf Sie selbst, bieten aber tiefere, physikalische Einblicke. Diese Erkenntnisse sind beispielsweise für die Weiterentwicklung neuer Technologien nötig. Es kann also sinnvoll sein, die Relevanz der bei der Aktivität gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der beiden genannten Aspekte zu interpretieren.



B6 Der Energieeinsparvertrag aus Kapitel 9 hat direkte Auswirkungen auf Ihr eigenes Verhalten.

Aktivitätsvorschlag: Deutsches Museum

Eine gute Möglichkeit für außerunterrichtliche Aktivitäten stellen Museen mit wissenschaftlichem Schwerpunkt dar, z. B. das Deutsche Museum in München. Es gilt als eines der größten Wissenschafts- und Technikmuseen der Welt. Musste man früher nach München fahren, um die Angebote des Deutschen Museums nutzen zu können, so findet man heute auch viele Online-Angebote und Livestreams.



B7 Haupteingang des Deutschen Museums.

Hinweis: In Nordbayern bietet sich eine Dependance des Deutschen Museums an: Deutsches Museum Nürnberg – Das Zukunftsmuseum.

Im Folgenden sollen beispielhaft verschiedene Möglichkeiten dargestellt werden, wie die außerunterrichtliche Aktivität beim Deutschen Museum gestaltet werden kann. Darüber hinaus gibt es aber noch zahlreiche weitere Möglichkeiten wie das „Kerschensteiner Kolleg“, bei dem die außerunterrichtliche Aktivität im Deutschen Museum über mehrere Tage hinweg noch ausführlicher gestaltet werden kann, oder verschiedene Schulklassenprogramme.

Der Klassiker: Der Museumsbesuch

Von der Geschichte der Energietechnik bis zu Mitmachstationen zum Thema Magnetismus und Elektrizität, vom Schiffsbau bis zur Astronomie: Ausstellungen fordern zum Entdecken vielfältiger Informationen auf. Jüngere Schülerinnen und Schüler werden mit Forscherbögen oder Entdeckerkarten durch die unterschiedlichen Ausstellungen geleitet, ältere Lernende nutzen thematische Führungen oder sammeln selbst Informationen für ein Referat, einen Bericht oder ein Forschungsprojekt. Vorführungen, wie die Blitzshow oder der Besuch im Planetarium, runden einen Besuch im Deutschen Museum ab.

Mögliche Aktivitätsziele: 3, 5, 6, 7

Der Zukunftsweisende: Vorträge mit Diskussion

Regelmäßig ist der Ehrensaal des Deutschen Museums der Austragungsort von Vorträgen der Reihe „Wissenschaft für jedermann“. Ob Wissenschaftskabarett, die Präsentation des deutschen Zukunftspreises oder Vorträge zu aktuellen Forschungsgebieten, die Vorträge richten sich an den Laien ebenso, wie an interessierte Experten. Wer nicht vor Ort den Vorträgen folgen kann, dem bietet sich meist per Livestream die Möglichkeit, dem Vortrag zu folgen und per Chat Fragen zu stellen.
Aktuelle Themen werden aber auch außerhalb dieser Reihe aufgegriffen und mit hochrangigen Experten diskutiert. Auch hierzu sind Schulen herzlich eingeladen.

Mögliche Aktivitätsziele: 1, 2, 3, 4, 5

Der Digitale: Experimentieren@home

Der Besuch eines außerschulischen Lernortes bietet verschiedenartige Eindrücke im Kontext der Wissenschaften. Doch was, wenn ein Besuch vor Ort nicht möglich ist? Wenn die Schule nicht zum Experimentieren in das Museum kommen kann, kommt das Museum in die Schule: Die herunterladbaren Experimentierkarten unter dem Titel „Experimentieren@Home“ geben Anregungen und Anleitungen zum Experimentieren vor Ort oder in der Schule bzw. zu Hause. Die verwendeten Materialien sind leicht zu beschaffen und die Experimente Schritt für Schritt erklärt und mit Forschungsfragen und Ausblicken ausgestattet. Zusätzlich gibt es Videos der erprobten Experimente. Das Angebot wird permanent erweitert und zu Experimentengruppen zu jeweils einem Oberthema (z. B. „Ostern“) ausgebaut.

Mögliche Aktivitätsziele: 3, 4, 5, 6, 7

Aktivitätsvorschlag: Das Energiedorf – ein Zukunftsprojekt

Die außerunterrichtliche Aktivität kann auch etwas praxisnaher gestaltet werden, indem Projekte durchgeführt werden, die eine direkte Relevanz für den Alltag vieler Menschen haben. Im Folgenden soll das Dorf Wildpoldsried vorgestellt werden, das sich schon seit vielen Jahren dem Thema „regenerative Energien“ verschrieben hat. Dieses und ähnliche Projekte bieten sich an, um eine Zusammenarbeit im Rahmen der außerunterrichtlichen Aktivität durchzuführen.



B8 Ortsschild Wildpoldsried.

Wildpoldsried, ein Dorf im Allgäu, entwickelt schon seit 1999 mit der Beteiligung der Bürger Konzepte (und setzt diese auch um!), die die Ortschaft zu einem Vorzeigedorf über die Grenzen Bayerns hinaus machten. Die Photovoltaik bildet hier die Grundlage der eigenständigen Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen, ausgebaut wurde das Konzept mittlerweile durch einen Windpark. Zusätzlich wurden einige Maßnahmen ergriffen, um Energie einzusparen. So wurden Straßenlaternen mit LEDs ausgestattet und auf eine nachhaltige, energiesparende und energieeffiziente Bauweise geachtet. Die Erfolge können sich sehen lassen, Wildpoldsried hat für seine Projekte diverse internationale Preise und Gütesiegel erhalten, unter anderem 2009 den deutschen Solarpreis und bereits zwei Mal den European Energy Award.

In Wildpoldsried werden auch noch weitere Projekte durchgeführt. Im Mediencode finden sich Information zu IRENE, ein Projekt im Zusammenhang mit Elektromobilität.



MC 67051-60

Neben dem siebenfachen des Eigenbedarfs an Strom, der von Wildpoldsried in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird, profitiert die Öffentlichkeit von den Bildungszielen, die sich die Ortschaft gesetzt hat. Im Projekt „Marshallplan für Afrika“ wurden Multiplikatoren ausgebildet, um sogenannte „Solarkoffer“ vor Ort aufbauen und betreiben zu können. Schulklassen werden, ebenso wie die breite Öffentlichkeit, eingeladen, sich mit dem Thema „Energiedorf“ zu beschäftigen und vor Ort Experimente und Beobachtungen zu machen. Den Ideen dieses innovativen Ansatzes sind keine Grenzen gesetzt!



B9 Solarkoffer für Afrika.

Folgende Schritte wären nötig, um eine außerunterrichtliche Aktivität mit einem Ort wie Wildpoldsried durchzuführen:

- Sammeln Sie zunächst Ideen für Projekte, die gemeinsam mit einem solchen Ort umgesetzt werden können.
- Nehmen Sie Kontakt mit dem Ort auf und wägen Sie ab, inwiefern eine außerunterrichtliche Aktivität durchführbar ist. Führen Sie auch eine „Machbarkeitsstudie“ durch, die den Aufwand und das zu erwartende Ergebnis bewertet.
- Diskutieren Sie Möglichkeiten, die nötigen Ressourcen möglichst gering zu halten, dabei aber ein möglichst wertvolles Ergebnis (in Hinsicht Erkenntnissen oder Aktivitäten) zu erhalten.
- Überarbeiten Sie Ihr Projekt anhand der Ergebnisse der Machbarkeitsstudie.

Aktivitätsvorschlag: Physikalisches Forschungsprojekt

Nicht immer muss die Anregung von außen kommen, oft finden sich kreative, spannende und innovative Forschungsprojekte bereits im Klassenzimmer. Statt also einer Aktivität außerhalb der Schule können auch Hobbys und Erfahrungen aus dem Lebensalltag den Rahmen für ein selbstinszeniertes Forschungsprojekt bilden. Experten in und außerhalb der Schule unterstützen gerne bei der Umsetzung.



B10 \ Modell eines Stirlingmotors.

Beispiele für physikalische Forschungsprojekte:
- Bau eines Stirlingmotors nach dem Prinzip „Einfälle statt Abfälle“
- Astronomie und Astrologie
- Der Nutzen von Physik für den höchsten „Adrenalinkick“ auf dem Jahrmarkt

Beispielhafter Ablauf: Deutsches Museum

Mögliche Aktivitätsziele: 1, 2, 4, 5, 7

Eine Klasse behandelt im Rahmen eines Projekts das Thema Energiewende und deren globale Auswirkungen. Bei der Recherche zu dem Projekt findet eine Gruppe von Lernenden einen Vortrag zum Thema „Lichtverschmutzung und Energiearmut“ in der Reihe der Montagskolloquien am Deutschen Museum München. Die Klasse beschließt mit Ihrer Lehrkraft, den Vortrag zu besuchen um die Erkenntnisse hieraus in ihr Projekt einfließen zu lassen.





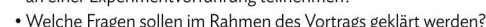
B11 \ Lichtverschmutzung.

Da der Vortrag auch live übertragen wird, muss zunächst die Form der Teilnahme diskutiert werden. Die Klasse entscheidet sich für die Teilnahme vor Ort, da sie auch die Ausstellung besuchen und für ihre Recherche nutzen will.

Neben der Anmeldung zum Vortrag und der Beantragung der Exkursion bei der Schulleitung, bereitet sich die Klasse auf den Besuch am Deutschen Museum vor.
- Welche Ausstellungsbereiche haben einen Bezug zum Projektthema?
- In welche Unterprojekte lässt sich das Thema gliedern, sodass es arbeitsteilig möglichst umfassend beleuchtet werden kann? Wer bearbeitet welches Teilthema?
- Sind außer dem Ausstellungsbesuch und dem Vortrag noch weitere Angebote vorhanden, die genutzt werden können? Möchte man eine Führung buchen oder an einer Experimentvorführung teilnehmen?



B12 \ Auch die Zusammenarbeit mit anderen Fächern ist möglich.



- Welche Fragen sollen im Rahmen des Vortrags geklärt werden?
- Wie und wo erfolgt die Präsentation der (Teil-) Ergebnisse?
- Kann das Projekt in Zusammenarbeit mit anderen Fächern bearbeitet werden?

Die Klasse entscheidet sich dafür, die Fächer Geschichte und Biologie mit in das Projekt einzubinden. So soll aufgearbeitet werden, worin die Energiewende ihren Ursprung hatte und welche Auswirkungen das Energieangebot im jeweiligen Land auf die Tier- und Pflanzenwelt hat.
Eine Gruppe der Klasse kümmert sich nun darum, mit den weiteren Fachlehrern das Projekt abzustimmen und zu koordinieren. Eine weitere Gruppe nimmt Kontakt mit dem Deutschen Museum auf. Am Exkursionstag wird die Gruppe von einem Wissenschaftler des Deutschen Museums in Empfang genommen und erhält zunächst eine thematische Überblicksführung, die die historische Entwicklung der Energieversorgung genauer in den Blick nimmt. Im Anschluss gibt es genügend Zeit für die eigene Recherche der verschiedenen Teilgruppen. Des Weiteren wird eine Show im Planetarium auf dem Programm stehen, die das Ausmaß und die Entwicklung der „Lichtverschmutzung" an verschiedenen Orten in den Fokus nimmt. Die Vortragende des Abends wurde über die bereits formulierten Fragen der Klasse in Kenntnis gesetzt und hat versprochen, darauf einzugehen.



B13 Cartoon zur Anbahnung der Energiewende. *© Gerhard Mester, 2012*

Im Anschluss an die Exkursion hat die Klasse beschlossen, auf dem Schulfest ihre Ergebnisse zu präsentieren. Es entsteht ein kleiner Film, in dem die Teilgruppen ihre Erkenntnisse vorstellen und Handlungsmöglichkeiten diskutieren. Mit der Vortragenden am Deutschen Museum wurde ein Interview geführt und in den Film eingebunden. Anhand eines Plakates wurden die Gesamtergebnisse zusammengetragen und den Gästen des Schulfestes präsentiert. Hierzu wurden auch Vertreter des Deutschen Museums eingeladen. Einzelne Lernende aus der Klasse haben sich dazu entschieden, das Projekt im Rahmen von Jugend Forscht bzw. ihrer Seminararbeit weiter zu verfolgen.

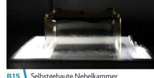

B14 Lichtverschmutzung im tropischen Regenwald.

Beispielhafer Ablauf: Zusammenarbeit mit einem Schülerlabor

Mögliche Aktivitätsziele: 2, 4, 7

Die Entstehung neuer und kontrovers diskutierter wissenschaftlicher Theorien soll mit dem Schwerpunkt auf die aktuelle Forschung behandelt werden. Ziel ist es, die Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie und deren Auswirkungen für die Physik unserer Zeit nachvollziehen zu können. Hierfür werden, über das Schuljahr verteilt, mehrere Aktivitäten mit dem nächstgelegenen Standort von „Netzwerk Teilchenwelt" eingeplant. Das Projekt, das von der TU Dresden geleitet wird, vermittelt Grundlagen, aber auch neueste Erkenntnisse aus der Forschung an Lernende, Studierende und Lehrende. Über ganz Deutschland verteilte Standorte an Universitäten und Forschungseinrichtungen betreuen Schulklassen, aber auch einzelne interessierte Personen im Bereich der Kern- und Teilchenphysik.

Unsere Klasse beginnt mit experimentellen Methoden zum Nachweis von Teilchen. Die Experimentiersets zum Bau von Nebelkammern können am jeweiligen Standort von Netzwerk Teilchenwelt (nach einer kurzen Einführung) ausgeliehen werden. An der Schule bauen die Lernenden in Gruppen die Nebelkammern auf und erleben die Entdeckung erster Teilchen, die uns permanent umgeben. Schnell entsteht eine Diskussion darüber, worin sich die Teilchenspuren unterscheiden und welche Teilchen hier nachgewiesen wurden. Mithilfe eines elektrisch aufgeladenen, aufgeblasenen Luftballons können sogar Alpha-Teilchen in die Nebelkammer eingebracht werden. Weitere Experimente können folgen, so z. B. die Messung mit Szintillationszählern oder ein Modell des Kamiokande-Experiments.



B15 \ Selbstgebaute Nebelkammer.

Nach den ersten Erfahrungen mit Messmethoden im Kontext der Teilchenphysik, nimmt die Klasse an einer „Masterclass" teil. Studierende des Standorts kommen hierfür in die Schule und schulen die Klasse in der Auswertung aktueller realer Messwerte von Experimenten, wie z. B. am ATLAS Detektor am CERN. Nach einem kurzen Training können die Lernenden selbst die Daten auswerten und sich auf die Suche neuer Entdeckungen machen oder Erfolge, wie den Nachweis des Higgs-Bosons, nacherleben.



B16 \ Der ATLAS-Detektor am CERN.

Das Ende dieses Aktionstages bildet eine Konferenz, in der die Lernenden jeweils ihre Ergebnisse präsentieren und mit ihren Klassenkameraden und den Studierenden diskutieren. Dies kann auch im Rahmen einer Videokonferenz mit Teilnehmern anderer Schulen in Deutschland oder der ganzen Welt stattfinden. Das Vorgehen und die Ergebnisse der einzelnen Gruppen werden hier im Plenum diskutiert. Die Teilnehmenden berichten nicht nur von ihren eigenen Erfahrungen und Ergebnissen, sondern hinterfragen und beurteilen konstruktiv auch die Darstellungen der anderen Gruppen. Die Vorgehensweisen werden verglichen und Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Herangehensweisen und Herausforderungen erörtert.
Für interessierte Lernende bietet sich nun die Möglichkeit, hier anzuknüpfen. „Jugend Forscht"-Arbeiten oder Seminararbeiten können in Zusammenarbeit mit dem außerschulischen Lernort entstehen. Die Erfahrung, die man selbst gemacht hat, kann man bei der Betreuung anderer Gruppen weitergeben. Oder man nutzt die Möglichkeit, bei Aktionen, die durch den außerschulischen Lernort veranstaltet werden, weitere interessierte Lernende zu treffen und sich auszutauschen.

Arbeitsaufträge

1 \ Entscheiden Sie sich gemeinsam mit Ihrer Klasse für eine außerunterrichtliche Aktivität und führen Sie diese durch. Sie können die auf den vorherigen Seiten dargestellten Vorschläge aufgreifen, aber natürlich auch eigene Ideen einbringen. Legen Sie dafür auch mindestens zwei der sieben aufgeführten Aktivitätsziele fest und bearbeiten Sie diese im Zuge der Aktivität, um auf die Art möglichst zielgerichtet vorzugehen und den maximalen Nutzen daraus zu ziehen.

13 Vertiefung

13.1 Vertiefung: Physik auf dem Jahrmarkt

M1 Nervenkitzel durch Physik



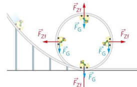
Auf jedem Jahrmarkt findet man sie: Kettenkarusselle, Loopings, Schießbuden und vieles mehr. Sie alle haben eines gemeinsam: Starke physikalische Kräfte sorgen für eine Adrenalinausschüttung und erzeugen damit das Gefühl des Nervenkitzels. Eine besondere Attraktion, der „Insanity Ride", befindet sich auf dem Dach des Casinos Stratosphere in Las Vegas. Das Karussell, das wie ein Krake aussieht, hängt in einer Höhe von über 300 m über dem Boden. Während der Fahrt werden Geschwindigkeiten von bis zu 65 $\frac{km}{h}$ erreicht. Die Sitze werden dabei bis zu einem Winkel von 70° geneigt, sodass man fast senkrecht nach unten auf die beeindruckende Skyline von Las Vegas blicken kann.

Arbeitsauftrag

a) Stellen Sie die Situation in einer beschrifteten Skizze dar. Tragen Sie alle relevanten Daten in die Skizze ein. Schätzen Sie weitere benötigte Maße anhand des Fotos ab.
b) Zeichnen Sie die Kräfte ein, die auf den Fahrgast wirken (Zentripetalkraft, Gewichtskraft, Unterlagenkraft).
c) Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit beim maximalen Auslenkwinkel von 70° und die Dauer für eine Umdrehung.
d) Den Hinweisen des Betreibers ist zu entnehmen, dass aufgrund der enormen Kräfte nur gesunde Personen das Karussell nutzen dürfen. Berechnen Sie die Kraft, mit der die Person in den Sitz gepresst wird, in Vielfachen ihrer Gewichtskraft.
e) Erörtern / Bewerten Sie die Gesundheitsrisiken und Sicherheitsfragen.

M2 Achterbahnfahrt der Physik – Platzwahl und Sicherheit

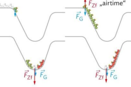
Hügel und Täler, überhöhte Kurven und Loopings, dies sind einige der Elemente, die in keiner Achterbahn fehlen dürfen. Durch verschiedene Arten und Ausprägungen von Beschleunigungen erleben wir das Gefühl der Schwerelosigkeit, das Gefühl, aus der Bahn zu fliegen oder das „in den Sitz gepresst werden". Doch auch die Platzwahl will bei der Achterbahnfahrt bedacht sein. Besonders an den vordersten und den hintersten Sitzen bilden sich bei Achterbahnen die längsten Warteschlangen. Und dies liegt, besonders bei den vorderen Plätzen, nicht nur am zusätzlich zu spürenden Fahrtwind und dem besten Blick in den Abgrund.



Arbeitsauftrag

a) Erklären Sie, basierend auf der Kräfteverteilung innerhalb der Achterbahn während der Fahrt, die höhere Beliebtheit der äußeren Wagen gegenüber den mittleren Wagen.

Spricht man von den Kräften, die bei der Achterbahnfahrt auf die Mitfahrer wirken, so legt man hierbei eine praktische Vereinfachung zugrunde: Die Achterbahn wird als eine feste Einheit mit beschränkter räumlicher Ausdehnung betrachtet. Vernachlässigt wird hierbei, dass die Fahrgeschäfte aus mehreren einzelnen Wagen bestehen, die wiederum Kräfte aufeinander ausüben. Diese Wagen sind fest miteinander verbunden, sodass zu einer Momentaufnahme (vgl. Abbildung) alle Wagen zwangsweise die gleiche Geschwindigkeit aufweisen. Allerdings befinden sie sich zu dieser Momentaufnahme an verschiedenen Orten, sodass die auf den jeweiligen Wagen wirkenden äußeren Kräfte unterschiedliche Beträge und Richtungen aufweisen können.



Doch wie sieht das Kräfteverhältnis innerhalb der Achterbahn konkret aus? Hierzu betrachten wir nun einen voll besetzten Zug mit fünf Wagen und gleichmäßiger Gewichtsverteilung, der gerade am höchsten, noch fast waagrechten Punkt seine Fahrt beginnt. Sobald der erste Wagen in Richtung der stark nach unten geneigten Schienen kippt, verursacht die auf ihn wirkende Gravitationskraft nun eine Beschleunigung des Wagens – und damit des gesamten Zuges - entlang der Schienen auf den Erdboden zu. Mit jedem weiteren Wagen wird die Komponente der Gravitationskraft in Bewegungsrichtung – und damit auch die Geschwindigkeit des passierenden Wagens an diesem Punkt – größer. Passagiere im letzten Wagen erleben daher den Beginn der beschleunigten Fahrt schon in der noch fast waagrechten Startposition und passieren den Kipppunkt bereits mit einer hohen Geschwindigkeit. Die sogenannte „Airtime“ bei der Abfahrt wird dadurch wesentlich intensiver erlebt.

Eine weitere, physikalisch wie für den Fahrspaß entscheidende Position in der Schienenführung der Achterbahn ist der jeweils tiefste Punkt einer Runde. Solange der Großteil des Zuges sich in der Abwärtsbewegung befindet, nimmt die Geschwindigkeit des gesamten Gespanns zu. Erst zu dem Zeitpunkt, in dem der mittlere Wagen den tiefsten Punkt erreicht hat, ändert sich dies. Die beiden vorderen Wagen befinden sich zu diesem Zeitpunkt bereits in einer Aufwärtsbewegung, was zu einer Abbremsung des gesamten Gespanns führt. Da diese genauso groß ist wie die positive Beschleunigung, die durch die Abwärtsbewegung der hinteren beiden Wagen auf den gesamten Zug wirkt, ist dies der Moment, in dem der Betrag der Geschwindigkeitsänderung für einen kurzen Moment für das gesamte Gespann den Wert Null annimmt. Anschließend wirkt die Gravitationskraft wiederum abbremsend auf den gesamten Zug, bis der mittlere Wagen den höchsten Punkt erreicht hat und die nächste Runde beginnt.

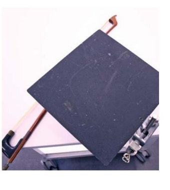
b) Besonders intensive Achterbahnfahrten sind für Personen mit Rückenschäden oder ähnlichen Einschränkungen nicht geeignet. Analysieren Sie die Kraftwirkung der Achterbahnfahrt in verschiedenen Punkten auf den menschlichen Körper. Gehen Sie dabei auf mögliche gesundheitliche Folgen ein.
c) Entscheiden Sie, welchen Wagen ein gesunder Mensch wählen sollte, der die Belastung auf seinen Körper möglichst gering halten möchte.
d) Immer wieder wird von tragischen Unfällen auf Jahrmärkten berichtet. Auch wenn diese sehr selten sind, enden sie häufig tödlich. Recherchieren Sie die Sicherheitsmaßnahmen, die zur Vermeidung solcher Unfälle getroffen werden, und beschreiben Sie die physikalischen Hintergründe, die zur Erhöhung der Sicherheit führen.
e) Projektvorschlag: Begeben Sie sich in die Position eines Forschers. Entwerfen Sie eine Forschungsfrage, die Sie anhand von Experimenten erforschen. Bedienen Sie sich dabei sowohl an Modellen (Autorennbahn mit Looping?) als auch digitalen Möglichkeiten der Messwerterfassung (Sensoren, Videoanalyse). Dokumentieren Sie Ihr Vorgehen und Ihre Erfolge ebenso, wie auftretende Herausforderungen und Sackgassen.

M1 Chladnische Klangfiguren – Resonanz

Ein Saiteninstrument kann als mechanisch-akustischer Wandler aufgefasst werden. Durch Streichen, Zupfen oder Schlagen werden die Saiten zu Schwingungen angeregt. Über einen Steg werden diese mechanischen Schwingungen auf den Resonanzkörper übertragen. Der vom Resonanzkörper eingeschlossene Hohlraum des Instruments trägt dabei entscheidend zum Klangbild bei: Die Schwingungen von Boden und Decke regen im Zusammenspiel den Resonanzkörper an und pflanzen sich in Schallwellen fort. Es entstehen so verschiedene Resonanzen unterschiedlicher Frequenz und Dämpfung.
Wenn man Sand auf den Boden einer umgedreht liegenden Geige streut und die Geige durch einen im Korpus befindlichen Lautsprecher in Schwingung versetzt, lassen sich zweidimensionale stehende Wellen sichtbar machen. Die durch die Knotenlinien der Wellen entstehenden Muster werden als „Chladnische Klangfiguren“ bezeichnet. Die Abbildungen zeigen diese Figuren für verschiedene Frequenzen:

73 Hz	82 Hz	133 Hz	235 Hz
604 Hz	717 Hz	1050 Hz	2061 Hz

Im Zusammenspiel mit Steg, Decke und Boden entsteht so ein ganz charakteristischer Klang, was in M2 näher untersucht wird.
Im Arbeitsauftrag sollen Sie nun mit einem Geigenbogen und einer Klangscheibe Chladnische Klangfiguren erzeugen.



Benötigte Materialien:
- 1 Klangscheibe
- etwas Quarzsand
- 1 Geigenbogen

Arbeitsauftrag

a) Verteilen Sie gleichmäßig Quarzsand auf der Klangscheibe und streichen Sie sie seitlich mit dem Bogen an, sodass ein möglichst sauberer Ton erklingt. Halten Sie Ihre Beobachtungen fest.

b) Versuchen Sie, durch Festhalten der Klangscheibe an verschiedenen Randpunkten unterschiedliche Klangfiguren zu erzeugen. Nutzen Sie Ihr Smartphone, um die zugehörige Klangfrequenz zu messen, z. B. über die im Mediencode hinterlegte App. Skizzieren oder fotografieren Sie die schönsten Klangfiguren.



MC 67051-61

c) Versuchen Sie, das Zustandekommen der Klangfiguren selbstständig zu erklären. Recherchieren Sie dazu auch im Internet.

d) Für Fortgeschrittene: Erzeugen Sie Klangfiguren mit verschiedenen Klangscheiben.

M2 Frequenzen und Töne; Klangspektrum

Jedes Instrument hat seine eigene individuelle „Klangfarbe". Dies wurde in M1 visuell sichtbar gemacht. Spielt man einen bestimmten Ton, so schwingen die entsprechenden Obertöne mit. Dadurch klingt der Ton voller.

Es gibt Apps für das Smartphone, mit denen man diese Töne aufnehmen und darstellen kann (Beispiel: siehe Mediencode). Die Software führt dabei eine *Fourier-Analyse* durch; eine mathematische Vorgehensweise, bei der Töne in ihre Frequenzanteile zerlegt werden. Dadurch kann man alle Schwingungsfrequenzen sehen, aus denen der Ton besteht.

MC 67051-62

Bei Nutzung der App sollte darauf geachtet werden, dass für die Analyse die logarithmische y-Achse deaktiviert wird. Um die Analyse zu testen, können mit einem zweiten Smartphone mit einem Tongenerator Sinuswellen erzeugen werden. Dabei sollten auch Frequenzen mit einer Frequenz von 15 000 Hz oder mehr eingestellt werden.

Auch die Frequenzen von unterschiedlichen Tönen der Tonleiter können mit so einer App bestimmt werden. Wenn Sie kein Instrument besitzen, können Sie auch wieder eine App benutzen, die die Töne erzeugt. Über den Mediencode gelangen Sie zu einer Anwendung, mit der man verschiedene Töne auf einer Klaviertastatur anspielen kann.


MC 67051-63



Für Arbeitsauftrag a) empfiehlt es sich eine Tabelle wie rechts dargestellt zu nutzen.

Ton	Frequenz
C	...
D	...
E	...
F	...
...	...

Beim Betrachten von Oktaven könnte man die Ergebnisse in Tabellen der folgenden Art festhalten. (Das hochgestellte „+" und „−" stehen in diesem Fall für *eine Oktave höher* und *eine Oktave niedriger*.)

Ton	Frequenz
C^-	...
C	...
C^+	...

Ton	Frequenz
E^-	...
E	...
E^+	...

Arbeitsauftrag

a) Untersuchen Sie Töne, Intervalle, Frequenzen und Frequenzspektren. Gehen Sie dabei systematisch vor und stellen zunächst Hypothesen auf, die Sie in App-gestützten Experimenten überprüfen können. Gleichen Sie anschließend Ihre experimentell gewonnenen Erkenntnisse mit geeigneten Fachtexten im Internet ab. Falls Sie die über den Mediencode links verlinkte App nutzen, bietet sich für die Messung der Frequenz die Anwendung „Audio Autokorrelation", für die Messung des Frequenzspektrums die Anwendung „Audio Spektrum" an. Wenn Sie Anregungen zu Fragestellungen suchen, können Sie den Mediencode rechts als Hilfestellung nutzen.

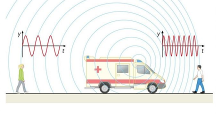

MC 67051-64

b) Recherchieren Sie mithilfe von Nachschlagewerken bzw. dem Internet die Begriffe *Obertton* und *Klangfarbe*.

c) Nehmen Sie verschiedene Musikinstrumente auf und erstellen Sie damit ein „Spektrumquiz", bei dem Ihre Mitschülerinnen und Mitschüler raten sollen, zu welchem Instrument das aufgenommene Frequenzspektrum gehört.

M3 Geschwindigkeitsbestimmung mit dem Dopplereffekt

Folgendes Phänomen haben Sie sicherlich schon häufiger erlebt: Ein Krankenwagen fährt mit eingeschaltetem Martinshorn an Ihnen vorbei; die Höhe des Tons hängt dabei davon ab, ob der Wagen auf Sie zu oder von Ihnen weg fährt. Verantwortlich dafür ist der in der Skizze dargestellte *Dopplereffekt*. Durch die Bewegung des Krankenwagens verändert sich auch die Position der Schallquelle. Bewegt sich der Krankenwagen auf Sie zu, verkürzt sich die wahrgenommene Wellenlänge im Vergleich zur tatsächlichen Wellenlänge des ausgesandten Tons und es erhöht sich die wahrgenommene Frequenz (die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls bleibt unverändert). Entfernt sich der Krankenwagen von Ihnen, wird die wahrgenommene Wellenlänge im Vergleich zur tatsächlichen Wellenlänge des ausgesandten Tons gestreckt und der wahrgenommene Ton wird tiefer. Betrachten wir diese beiden Fälle nun etwas genauer.



Fall 1: Sender bewegt sich auf Beobachter zu

Betrachten wir einen Wellenberg: Würde das Fahrzeug stehen, würden Sie das Signal mit der Frequenz f bzw. Periodenlänge T wahrnehmen, mit dem es auch ausgestrahlt wird. Wenn sich das Fahrzeug aber mit v auf Sie zubewegt, wird der Abstand zwischen den beiden Wellenbergen, den Sie registrieren, etwas geringer, da der zweite Wellenberg nun eine etwas kürzere Distanz zu Ihnen zurücklegen muss. Die Wellenlänge verkleinert sich dadurch:



$\lambda_{zu} = \lambda - v \cdot T < \lambda$

Ersetzen wir nun λ durch $\frac{c}{f}$ (c ist die Schallgeschwindigkeit) und T durch $\frac{1}{f}$, erhalten wir:

$$\lambda_{zu} = \frac{c}{f_{zu}} = \frac{c}{f} - \frac{v}{f} \Rightarrow f_{zu} = f \cdot \frac{c}{c - v} > f$$

Fall 2: Sender bewegt sich von Beobachter weg

Die Betrachtung verläuft analog, nur dass sich hier der Abstand zwischen den Wellenbergen durch die Bewegung des Krankenwagens vergrößert, statt sich zu verkleinern.

$$\lambda_{weg} = \lambda + v \cdot T > \lambda \Rightarrow f_{weg} = f \cdot \frac{c}{c + v} < f$$

Mit folgendem Experiment lässt sich der Dopplereffekt untersuchen: Erzeugen Sie mit einem Tongenerator (z. B. mit dem Handy, siehe Mediencode) einen Ton mit einer festen Frequenz, z. B. 900 Hz (maximale Lautstärke wählen!). Mit einem zweiten Handy können Sie, analog zu M2, diese Frequenz messen. Wenn sich nun die eine Person auf die andere zubewegt, kann die durch den Dopplereffekt hervorgerufene Frequenzänderung gemessen werden. Sie sollten sich dabei mit konstanter Geschwindigkeit bewegen und diese auch messen.



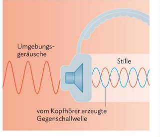
Arbeitsauftrag

a) Führen Sie das Experiment wie links beschrieben durch. Bestätigen Sie damit die Gleichungen, die links zum Dopplereffekt aufgestellt wurden.

b) Den Dopplereffekt gibt es auch bei Licht. Recherchieren Sie diesen und erklären Sie dadurch die Rotverschiebung von Galaxien.

c) Mithilfe des optischen Dopplereffekts können einzelne Atome abgebremst werden. Recherchieren und erklären Sie damit die Funktionsweise der „Laserkühlung".

M4 Active-Noise-Cancelling



Schalldämpfung ist in vielen Bereichen wichtig, um unser Gehör zu schützen oder generell störende Geräusche zu dämpfen. Neben der Möglichkeit, die Schallbelastung durch absorbierende Materialien zu reduzieren, gibt es die Active-Noise-Cancelling-Technik (ANC).
Wenn eine Schallwelle mit Antischall kombiniert wird, löschen sich der Schall und die 180° phasenverschobenen Antischallwelle gegenseitig aus (Superpositionsprinzip). Dazu muss der störende Schall mit einem Mikrofon aufgenommen und mithilfe eines Computers so wiedergegeben werden, dass sich durch Interferenz beide Schallwellen auslöschen (vgl. Abbildung). Dieser Vorgang muss so abgestimmt sein, dass die Auslöschung genau am Trommelfell passiert. Da der Gehörgang jedoch bei jedem unterschiedlich ist und der Schall auch über die Vibration der Knochen übertragen wird, werden die Umgebungsgeräusche (noch) nicht vollständig unterdrückt. Daher werden passiver und aktiver Schallschutz in den heutigen Over-Ear-ANC Kopfhörern kombiniert.



Arbeitsauftrag

a) Um Lautstärken messen und vergleichen zu können, verwendet man einen sog. Schallpegelmesser. Informieren Sie sich über die physikalische Einheit Dezibel („dB“) und sammeln Sie tabellarisch einige Beispiele mit unterschiedlichem Schallpegel.

b) Verwenden Sie eine geeignete Smartphone-App (vgl. M2) und messen Sie die Lautstärke verschiedener Ereignisse innerhalb eines Tags. Vergleichen Sie sie mit der Tabelle von Aufgabe a) und bewerten Sie die Lärmbelastung, der Sie in Ihrem Alltag ausgesetzt sind.



c) Simulieren Sie die die Auslöschung zweier gegenphasiger Schallwellen gleicher Wellenlänge mithilfe zweier Smartphones, auf denen eine geeignete App den jeweils gleichen Ton (z.B. 440 Hz) erzeugt (vgl. M2). Die Gegenphasigkeit lässt sich über einen geeigneten Abstand der Geräte erzeugen. Dokumentieren Sie Ihre Beobachtungen und erklären Sie, dass sich keine vollständige Auslöschung erreichen lässt.

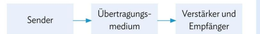
d) Durch zu große und zu lange Schallimmissionen kann das Gehör Schaden nehmen. Recherchieren Sie die Gesundheitsrisiken bei intensiver Nutzung von Kopfhörern. Beurteilen Sie, inwieweit Kopfhörer mit ANC die Gesundheitsrisiken fördern oder reduzieren können.

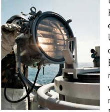
e) Im Zug oder Bus nichts außer der eigenen Musik hören zu müssen, kann sehr entspannend sein. Auf dem E-Scooter oder Fahrrad einen Kopfhörer zu nutzen, stellt allerdings ein Risiko dar - vor allem mit ANC. Informieren Sie sich über die Rechtsgrundlage bei der Verwendung von Kopfhörern im Straßenverkehr. Verfassen Sie eine persönliche Bewertung darüber, ob und wie Sie Kopfhörer im Straßenverkehr verwenden.

13.3 Vertiefung: Signalübertragung per Licht

M1 Optische Kommunikation

Signalübertragung per Licht, auch optische Kommunikation genannt, kann auf ganz unterschiedliche Weise geschehen. Alle Methoden sind nach dem folgenden System aufgebaut:





Der Sender muss bei der optischen Kommunikation die Information in ein Lichtsignal umwandeln, das Übertragungsmedium überträgt das Lichtsignal an den Ort des Empfängers und der Empfänger muss das (verstärkte) Lichtsignal wieder in die ursprüngliche Information decodieren.

Die einfachste Form dieser Signalübertragung ist sicherlich das Lichtmorsen, das in der Seefahrt noch heute eingesetzt wird. Beim Lichtmorsen ist die zu übertragende Information – meist ein SOS-Signal oder ein sonstiger Notruf – zunächst als Text vorhanden. Dieser muss in eine Folge von „Licht an“-„Licht aus“-Sequenzen als blinkendes Licht übertragen werden. Hierzu dient das Morse-Alphabet.

A ·–	J ·–––	S ···
B –···	K –·–	T –
C –·–·	L ·–··	U ··–
D –··	M ––	V ···–
E ·	N –·	W ·––
F ··–·	O –––	X –··–
G ––·	P ·––·	Y –·––
H ····	Q ––·–	Z ––··
I ··	R ·–·	

Arbeitsauftrag

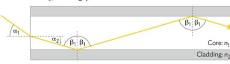
a) Informieren Sie sich über das Lichtmorsen und konkretisieren Sie dann die Bestandteile der Signalübertragung für das Lichtmorsen.

b) Beschreiben Sie die Funktionsweise anhand der Übertragung des SOS-Signals. Versuchen Sie, die Beschreibung in allen drei Lichtmodellen anzufertigen, und entscheiden Sie dann, welches Modell hierfür am geeignetsten ist.
Begründen Sie, dass trotz umfassender Technikausrüstung auch heute noch jedes Schiff eine Lichtmorseausrüstung an Bord hat.

c) Mithilfe einer App können Sie auch Ihre Smartphone-Taschenlampe zum Lichtmorsen nutzen. Probieren Sie eine geeignete App aus und versuchen Sie, sich auf die Art gegenseitig kurze Botschaften zu schicken.

M2 Glasfaserkabel als Lichtwellenleiter

Auch bei schnellen Internetanschlüssen setzt man auf die Signalübertragung per Licht. Hier kommen Glasfaserkabel als Leiter zum Einsatz, da sie im Vergleich zu Kupferkabeln eine sehr große Datenübertragungsrate von mehr als 10 Gigabit pro Sekunde liefern können. Die Funktionsweise der Glasfaserkabel beruht auf dem Prinzip der Totalreflexion. Der Lichtwellenleiter besteht aus einem Kern („Core“) aus Quarzglas, der von einem Mantel („Cladding“) aus Quarzglas einer andere Sorte umgeben ist, die einen minimal kleineren Brechungsindex besitzt. Darüber befindet sich noch eine Plastikschutzhülle („Coating“).

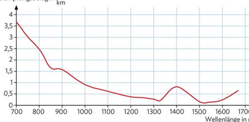


Arbeitsauftrag

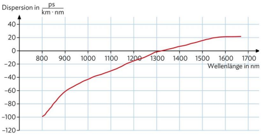
a) Recherchieren Sie den Begriff „Brechungsindex“. Erklären Sie diesen Begriff im Wellenmodell.

b) Das Brechungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Einfallswinkel α_1 und dem Brechungswinkel α_2 in Anhängigkeit von den Brechungsindizes n_1 und n_2 der beiden Medien, an deren Grenzfläche die Brechung erfolgt:
$\sin(\alpha_1) \cdot n_1 = \sin(\alpha_2) \cdot n_2$

Vorteile der Übertragung mit Glasfaserkabeln sind die geringe Störanfälligkeit durch Unwetter und elektromagnetische Störfelder und vor allem, dass viele Signale gleichzeitig ohne gegenseitige Störung übertragen werden können. Allerdings gibt es Probleme durch Leistungsverluste entlang der Strecke („Dämpfung"), welche zusätzlich noch von der Wellenlänge des Lichtsignals abhängt („Dispersion").
Um die Dämpfung eines Lichtsignals zu bestimmen, misst man die Lichtleistung beim Eintritt in den Lichtwellenleiter und beim Austritt. In der Praxis gibt man den sog. Dämpfungsbelag an, also die Dämpfung bezogen auf eine bestimmte Leiterlänge:



Auch die Dispersion – also die Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Wellenlänge – wirkt sich auf die Qualität des übertragenen Signals aus. Je höher die Dispersion, desto höher die Signalverzerrung:



2009 erhielt Charles Kuen Kao den Nobelpreis für Physik für seine „bahnbrechenden Erfolge auf dem Gebiet der Lichtleitung mittels Fiberoptik für optische Kommunikation". Er hatte in den 1960er Jahren zur Optimierung der Glasfaserkabel geforscht. Damals war zwar diese Theorie der Übertragung schon bekannt, aber aufgrund der schlechten Glasfaserqualität mit vielen Verunreinigungen war die Dämpfung sehr stark, sodass das Licht nur für sehr kurze Streckenlängen, wie in der Endoskopie, verwendet werden konnte. Seine Forschungsarbeit bildete die Grundlage für die moderne, bis heute genutzte Datenübertragung.



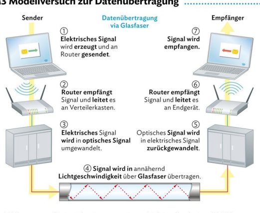
Vereinfachen Sie das Brechungsgesetz für den Grenzwinkel α_G, ab dem Totalreflexion eintritt. Berechnen Sie den maximalen Eintrittswinkel des Lichts aus der Luft in den Lichtleiter für $n_1 = 1{,}48$ und $n_2 = 1{,}46$.

c) Bei der Herstellung der Glasfaserkabel möchte man einen möglichst geringen Unterschied der Brechungsindizes von Core und Cladding erreichen. Begründen Sie dies. Bei Bedarf können Sie die hinterlegten Hilfestellungen in Anspruch nehmen.
Hilfestellung auf Seite 210-212

d) Bestimmen Sie anhand der beiden Diagramme die optimale Lichtwellenlänge des Signals in Bezug auf Dämpfungs- und Dispersionsprobleme. Erläutern Sie den Einfluss der Dispersion auf die Qualität des übertragenen Signals.

e) Die Forschung treibt die Entwicklung optischer Datenübertragung mithilfe von Laserstrahlen voran, die ungeahnte Übertragungsraten besitzen. Informieren Sie sich über diese Technik und ihre Einsatzmöglichkeiten. Beurteilen Sie einen möglichen Einsatz dieser Technik für High-Speed-Internetanschlüsse im ländlichen Raum.

M3 Modellversuch zur Datenübertragung



Will man zur Datenübertragung einen Lichtwellenleiter (LWL) verwenden, müssen die elektrischen Signale in optische umgewandelt werden und umkehrt. Ein moderner, technischer Übertragungsweg ist oben dargestellt. Generell benötigt man zur optischen Übertragung als Sendeelement einen elektrooptischen Wandler, der das ursprüngliche Signal in ein optisches wandelt und dieses in einen LWL einkoppelt, siehe Aufbauschema unten. Empfangen und wieder in ein elektrisches Signal gewandelt werden die Daten wiederum durch ein Halbleiterbauelement, meist einen Fotodiode oder einen Fototransistor. Das Ausgangssignal liegt dann wieder in elektrischer Form vor und kann so mittels Kupferkabel zur Signalausgabe gelangen.



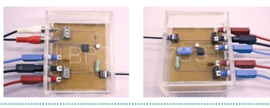
Wie so ein selbstgebauter Sender und Empfänger aussehen könnte, ist in den Bildern unten dargestellt. Im ersten Bild sehen Sie den Sender, unten rechts im Bild ist der LWL zu sehen. Darüber gelangt das Lichtsignal dann zum Empfänger (oben links im zweiten Bild). Der gesamte Aufbau ist im dritten Bild zu sehen.

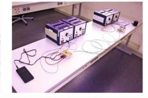
Arbeitsauftrag

a) Beschreiben Sie den dargestellten Weg der Datenübertragung via Glasfaserkabel, den ein elektrisches Signal heutzutage in vielen Anwendungen zurücklegen muss.

b) Bauen Sie zusammen mit Ihrer Lehrkraft einen Modellversuch zur Datenübertragung mittels LWL auf und testen Sie Ihre Übertragungsstrecke. Der Mediencode beinhaltet eine mögliche Bauanleitung für das Experiment, wie es auch auf den Fotos unten dargestellt ist. MC 67051-66
Hinweis: Der Modellversuch soll zum besseren Verständnis der Datenübertragung mittels LWL beitragen. Die genaue Funktionsweise von Sender und Empfänger muss höheren Jahrgangsstufen vorbehalten bleiben.

c) Identifizieren Sie Schwierigkeiten und Fehlerquellen beim Aufbau einer optischen Datenübertragung. Führen Sie Gründe an, dass selbst heutzutage nur ein kleiner Anteil an Haushalten mit einem Glasfaseranschluss versehen ist.

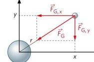




M1 Planetenbahnen

Als Isaac Newton 1687 seine „Principia" veröffentlichte, waren die Zeitgenossen begeistert. Denn auf der Basis der darin beschriebenen Gesetze war es erstmals möglich, die Bewegung von Himmelskörpern exakt für beliebige Zeiten vorauszuberechnen. So schrieb der Astronom Edmund Halley in einem Vorwort für die dritte Auflage: *„Join me in singing the praises of Newton, who reveals all this [...] No closer to the gods can any mortal rise."* In der Praxis ließen sich zu der damaligen Zeit jedoch nur Spezialfälle behandeln, in denen die Bewegungen durch feste Funktionsgleichungen beschrieben werden konnten. Man spricht hierbei auch von „analytischen Lösungen". Zu ihnen gehören z. B. auch die Ellipsenbahnen und damit die mathematische Begründung der Keplerschen-Gesetze.

Mit der Kleinschrittmethode aus Kap. 10 lassen sich jedoch prinzipiell alle Bewegungen beschreiben, die in der Astronomie auftreten. Wir beschränken uns hier auf Situationen mit nur zwei Himmelskörpern, z. B. Sonne und Erde oder Erde und Raumschiff / Satellit. Der Algorithmus zur Kleinschrittmethode muss dafür auf zwei Dimensionen erweitert werden. Die Abbildung zeigt das Koordinatensystem und die wirkende Kraft $\vec{F}_G$. Diese Gravitationskraft wird in zwei Komponenten aufgeteilt;



dabei gilt wegen ähnlicher Dreiecke: $\frac{\vec{F}_{G,x}}{\vec{F}_G} = \frac{|x|}{r}$ bzw. $\left|\vec{F}_{G,x}\right| = \frac{|x|}{r} \cdot \left|\vec{F}_G\right|$.

Berücksichtigt man die Richtungen, so erhält man $F_{G,x} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \frac{x}{r}$. Entsprechend ist $F_{G,y} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \frac{y}{r}$.
Der in beiden Kraftgesetzen auftretende Abstand des umlaufenden Himmelskörpers zum Zentralkörper berechnet sich mit dem Satz des Pythagoras zu $r = \sqrt{x^2+y^2}$.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	**Planetenbahnen**									
2	**Anfangswerte**					**Vereinfachende Annahmen**				
3	Startpunkt_x	x_0 =	0	m		t_neu = t_alt + dt				
4	Startpunkt_y	y_0 =	6371000	m						
5	Startgeschwindigkeit_x	v_x_0 =	9250	m/s		r_alt = Wurzel(x_alt^2+y_alt^2)				
6	Startgeschwindigkeit_y	v_y_0 =	0	m/s						
7	Startzeit	t_0 =	0	s		F_x_neu = - G * m_1 * m_2 * x_alt / r_alt^3				
8	Zeitintervall	dt =	10	s		a_x_neu = F_x_neu/m				
9						v_x_neu = v_x_alt + a_x_neu * dt				
10	Gravitationskonstante	G =	6,672E-11	m³/(kg s²)		x_neu = x_alt + v_x_neu * dt				
11	Erdmasse	m_E =	5,974E+24	kg						
12	Masse_fest	m_1 =	1	Erdmassen		F_y_neu = - G * m_1 * m_2 * y_alt / r_alt^3				
13	Masse_fest	m_1 =	5,974E+24	kg		a_y_neu_y = F_y_neu/m				
14	Masse_bewegt	m_2 =		Erdmassen		v_y_neu = v_y_alt + a_y_neu * dt				
15	Masse_bewegt	m_2 =	1000	kg		y_neu = y_alt + v_y_neu * dt				
16										
17	t in s	F_x in N	F_y in N	a_x in m/s²	a_y in m/s²	v_x in m/s	v_y in m/s	r in m	x in m	y in m
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9250,000	0,000	6371000,000	0,000	6371000,000
19	10,000	0,000	-9819,877	0,000	-9,820	9250,000	-98,199	6370689,580	92500,000	6370018,012
20	20,000	-142,595	-9819,799	-0,143	-9,820	9248,574	-196,397	6370740,306	184985,741	6368054,045

Arbeitsauftrag

a) Erstellen Sie die Tabelle nach dem angegebenen Muster. Beginnen Sie mit den oben dargestellten Anfangswerten. Sie simulieren damit den waagrecht abgeworfenen Stein von M2 auf S. 37. Ändern Sie die Startgeschwindigkeit und bestimmen Sie den Wert, bei dem sich eine Kreisbahn ergibt („erste kosmische Geschwindigkeit"). Erstellen Sie dafür ein *x*-*y*-Diagramm der Bewegung.

b) Bei größeren Startgeschwindigkeiten ergeben sich Ellipsenbahnen und ab einer bestimmten Geschwindigkeit Bahnen, die nicht mehr geschlossen sind: Der Stein verlässt für immer das Gravitationsfeld der Erde. Bestimmen Sie diese „zweite kosmische Geschwindigkeit".

c) Mit Komponenten der Startgeschwindigkeit $v_{y,0} \neq 0$ können Sie auch schräge Ellipsen erzeugen. Bei geeigneter Wahl des Zeitintervalls Δt lassen sich durch den Abstand der gezeichneten Punkte Änderungen in der Umlaufgeschwindigkeit feststellen. Erklären Sie diese qualitativ mit dem zweiten Keplerschen Gesetz.

M2 Schräger Wurf mit Luftwiderstand

In einer Dimension wurde der Einfluss des Luftwiderstands bereits in Kap. 10.2 betrachtet. Bei der Erweiterung zum schrägen Wurf in zwei Dimensionen ist es – wie in M1 – wieder nötig, die Reibungskraft in zwei Komponenten zu zerlegen. Das bedeutet jedoch nicht, dass z. B. der Anteil der Reibungskraft in x-Richtung nur von der Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung abhängt! Vielmehr gilt nach Betrachtung ähnlicher Dreiecke:

$$\frac{|\vec{F}_{R,x}|}{|\vec{F}_R|} = \frac{|\vec{v}_x|}{|\vec{v}|} \text{ bzw. } \vec{F}_{R,x} = \frac{|\vec{v}_x|}{|\vec{v}|} \cdot |\vec{F}_R|.$$

Weil die gesamte Luftreibungskraft $\vec{F}_R = \frac{1}{2}\, c_W \cdot \varrho \cdot A \cdot v^2$ beträgt, berechnet sich die x-Komponente somit zu $F_{R,x} = -\frac{1}{2}\, c_W \cdot \varrho \cdot A \cdot v \cdot v_x$. Bei der y-Komponente muss noch die Gewichtskraft berücksichtigt werden und man erhält: $F_{R,y} = -m \cdot g - \frac{1}{2}\, c_W \cdot \varrho \cdot A \cdot v \cdot v_y$.

Die benötigte Gesamtgeschwindigkeit berechnet man mit dem Satz des Pythagoras zu $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$. Es ist zweckmäßig, die Startgeschwindigkeit über die Gesamtgeschwindigkeit und den Abwurfwinkel α anzugeben. Für die Rechnung werden aber die beiden Komponenten benötigt; sie ergeben sich daraus als $v_x = v \cdot \cos\alpha$ und $v_y = v \cdot \sin\alpha$. Bei der Verwendung trigonometrischer Funktionen in Tabellenkalkulationsprogrammen müssen Sie sich unbedingt über die Art der Winkeleingabe informieren. Unter Umständen geht das Programm von Winkeln im Bogenmaß aus; der Startwinkel muss in diesem Fall erst noch umgerechnet werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	**Schräger Wurf mit Luftwiderstand**									
2	**Anfangswerte**					**Vereinfachende Annahmen**				
3	Starthöhe	y_0 =	0	m		t_neu = t_alt + dt				
4	Startgeschwindigkeit	v_0 =	20	m/s		v_alt = Wurzel(v_x_alt^2+v_y_alt^2)				
5	Startwinkel	alpha =	70	°						
6	Startgeschwindigkeit_x	v_x_0 =	6,840402867	m/s		F_x_neu = - (c_w * rho * A * v_alt * v_x_alt)/2				
7	Startgeschwindigkeit_y	v_y_0 =	18,79385242	m/s		a_x_neu = F_x_neu/m				
8	Startzeit	t_0 =	0	s		v_x_neu = v_x_alt + a_x_neu * dt				
9	Zeitintervall	dt =	0,01	s		x_neu = x_alt + v_x_neu * dt				
10	Ortsfaktor	g =	9,81	m/s²						
11	Masse	m =	3	kg		F_y_neu = - m * g - (c_w * rho * A * v_alt * v_y_alt)/2				
12	Querschnittsfläche	A =	0,00635	m²		a_y_neu_y = F_y_neu/m				
13	Dichte	rho =	1,29	kg/m³		v_y_neu = v_y_alt + a_y_neu * dt				
14	Widerstandsbeiwert	c_w =	0,45			y_neu = y_alt + v_y_neu * dt				
15										
16	t in s	F_x in N	F_y in N	a_x in m/s²	a_y in m/s²	v_x in m/s	v_y in m/s	v_ges in m/s	x in m	y in m
17	0,000	0,000	-29,430	0,000	-9,810	6,840	18,794	20,000	0,000	0,000
18	0,010	-0,252	-30,123	-0,084	-10,041	6,840	18,693	19,905	0,068	0,187
19	0,020	-0,251	-30,116	-0,084	-10,039	6,839	18,593	19,811	0,137	0,373

Arbeitsauftrag

a) Erstellen Sie die Tabelle nach dem angegebenen Muster. Die eingetragenen Daten sind Näherungswerte für eine Kugelstoßkugel, die sich durch Luft hindurch bewegt. Verwenden Sie einen realistischen Wert für Ihre eigene Startgeschwindigkeit und überprüfen Sie, ob die ermittelten Wurfweiten der Realität entsprechen. Hinweis: Die Kugel wird nicht vom Erdboden aus gestoßen!

b) Ein weiterer Test der Simulation kann durchgeführt werden, indem Sie die Situation auf eine exakt lösbare zurückführen. Mit z. B. $c_W = 0$ können Sie die Luftreibung „abstellen“. Setzen Sie außerdem den Startwinkel auf $\alpha = 90°$. Für den jetzt betrachteten senkrechten Wurf nach oben können Sie mithilfe des Energieerhaltungssatzes die maximale Wurfhöhe berechnen. Vergleichen Sie mit dem Ergebnis der Simulation.

c) Die Simulation kann nun dazu verwendet werden, Ihre Stoßtechnik zu optimieren. Verändern Sie bei fester Startgeschwindigkeit den Startwinkel, ermitteln Sie jeweils die Wurfweiten und geben Sie den optimalen Startwinkel an. Die Luftreibung soll jetzt wieder berücksichtigt werden.

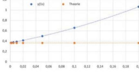
d) Schätzen Sie bei Ihrer maximalen Wurfweite den Einfluss der Luftreibung ab. Lassen Sie die Simulation dafür einmal mit $c_W = 0{,}45$ und einmal mit $c_W = 0$ laufen.

M3 Vorhersagekraft von Simulationen

Die Kleinschrittmethode, wie sie in M1 und M2 verwendet wurde, liefert zusammen mit den Newtonschen Gesetzen eine streng deterministische Beschreibung von Bewegungsvorgängen: Sind alle Zustandsgrößen eines mechanischen Systems zu einem Zeitpunkt t_0 bekannt, dann lässt sich der Zustand für jeden künftigen Zeitpunkt t Schritt für Schritt berechnen. Der Mathematiker und Astronom Pierre Simon de Laplace (1749-1827) formulierte die Konsequenzen für dieses mechanistische Weltbild anschaulich so: „*Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennte, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiss sein und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen.*" (Philosophischer Essay über die Wahrscheinlichkeit, 1814)

Die Aufgabe eines solchen „Laplaceschen Dämons" umfasst also drei Punkte:
- Erfasse genaue Daten für den Startzeitpunkt t_0 (Anfangswerte).
- Erstelle ein physikalisches Modell über den Zusammenhang dieser Daten.
- Formuliere ein mathematisches Verfahren, dessen Lösung die Daten zum Zeitpunkt t sind (Algorithmus).

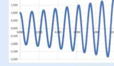
Alle drei Teilaufgaben sind keineswegs trivial. Mit der Genauigkeit von Messungen haben wir uns in Kap. 4.3 beschäftigt. Beim Modellieren in der Physik muss stets abgewogen werden zwischen der Berücksichtigung möglichst vieler Aspekte (z. B. der Luftreibung in M2) und der Übersichtlichkeit und Handhabbarkeit. Aus mathematischer Sicht sind neben der Kleinschrittmethode noch weitere numerische Algorithmen möglich; außerdem ist per se nicht klar, wie die Schrittweite Δt sinnvoll gewählt werden soll. Dazu betrachten wir nochmals die Simulation zur Schwingung eines Federpendels in Kap. 10.3. Weil hier eine exakte Beschreibung bekannt ist, nämlich $y(t) = y_{max} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{D}{m}} \cdot t\right)$, lässt sich die Vorhersage der Kleinschrittmethode mit den tatsächlichen Werten vergleichen. Die nebenstehende Abbildung zeigt den berechneten Wert für $y(t = 1\,\text{s})$ in Abhängigkeit von der Schrittweite Δt.



Arbeitsauftrag

a) Führen Sie die Simulation zur harmonischen Schwingung für beliebige feste Werte von D und m durch und variieren Sie die Schrittweite Δt. Erstellen Sie ein Diagramm zur Abweichung vom theoretischen Wert nach dem Muster oben und fügen Sie eine Trendlinie hinzu.

b) Geben Sie sich eine für Sie tolerierbare Abweichung vor. Bestimmen Sie die dazu nötige maximale Schrittweite.



c) Bei ungünstiger Formulierung der Kleinschrittmethode können sich Diagramme wie das nebenstehende ergeben. Begründen Sie physikalisch, dass die zugehörige Simulation fehlerhaft ist.

d) Im Internet gibt es freie Simulationsprogramme für vielfältige physikalische Elemente („Sandboxes"; Beispiel: siehe Mediencode) Experimentieren Sie mit einem solchen Programm. Formulieren Sie für einfache Situationen Kriterien, anhand derer Sie die Güte der Simulation beurteilen können.

MC 67051-67

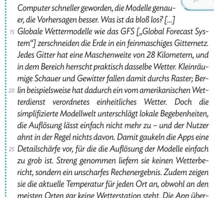
e) Der Text auf der nächsten Seite beschäftigt sich mit der Vorhersagekraft von Simulationen aus dem Bereich der Meteorologie. Stellen Sie zunächst die Aussagen zusammen, die der Text über die oben genannten drei Punkte macht. Beschreiben Sie dann die Gütekriterien, nach denen Simulationsergebnisse ausgewählt werden.

f) „*Wenn wir dauernd schreiben, wie unsicher eine Vorhersage ist, glaubt uns doch keiner mehr.*" Bewerten Sie die Sinnhaftigkeit von 14-Tages-Wetter-Prognosen und wägen Sie ab, ob Anbieter solcher Vorhersagen detaillierte Informationen zu deren Güte in ihren Apps angeben sollten.

Wer im Regen steht, ist selbst schuld



Rational betrachtet ist die Wettervorhersage eine der größten Erfolgsgeschichten, die die Wissenschaft in den vergangenen Jahrzehnten hervorgebracht hat. Die Meteorologie ist die einzige Disziplin, die verlässlich in die Zukunft sehen kann. Wer von Regen, Schnee und Sturm heutzutage überrascht wird, ist selbst schuld. Zumindest was die nähere Zukunft betrifft. […] Noch nie war es so einfach, sich über das Wetter zu informieren. Und dennoch scheinen viele Nutzer unzufrieden: Die Prognosen auf ihren Bildschirmen haben oft wenig mit dem wirklichen Wetter zu tun. Dabei sind die Computer schneller geworden, die Modelle genauer, die Vorhersagen besser. Was ist da bloß los? […]



Globale Wettermodelle wie das GFS [„Global Forecast System"] zerschneiden die Erde in ein feinmaschiges Gitternetz. Jedes Gitter hat eine Maschenweite von 28 Kilometern, und in dem Bereich herrscht praktisch dasselbe Wetter. Kleinräumige Schauer und Gewitter fallen damit durchs Raster; Berlin beispielsweise hat dadurch ein vom amerikanischen Wetterdienst verordnetes einheitliches Wetter. Doch die simplifizierte Modellwelt unterschlägt lokale Begebenheiten, die Auflösung lässt einfach nicht mehr zu – und der Nutzer ahnt in der Regel nichts davon. Damit gaukeln die Apps eine Detailschärfe vor, für die die Auflösung der Modelle einfach zu grob ist. Streng genommen liefern sie keinen Wetterbericht, sondern ein unscharfes Rechenergebnis. Zudem zeigen sie die aktuelle Temperatur für jeden Ort an, obwohl an den meisten Orten gar keine Wetterstation steht. Die App überträgt einfach den Messwert der nächstgelegenen Station auf den angegebenen Ort.

Neben dem GFS existieren derzeit etwa ein Dutzend solcher Globalmodelle, darunter auch das seit wenigen Wochen kostenlos verfügbare Modell ICON des Deutschen Wetterdiensts. Als bestes Modell der Welt gilt das kostenpflichtige Modell des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersagen (EZMWF) aus Reading bei London, das kürzlich auch den Pfad von Hurrikan Irma am genauesten berechnet hat.

Die Wetterdienste versuchen die Auflösung der Modelle zu verbessern. Ziel ist eine kilometergenaue Sicht auf die Atmosphäre. Doch das ist nicht einfach: Eine Prognose ist immer nur so gut wie die Messdaten, mit denen das Modell gefüttert wird. Deshalb funken rund 11 000 Wetterstationen weltweit Temperatur, Luftdruck, Regenmengen, Windrichtung und Windgeschwindigkeit an die Wetterdienste. Das deutsche Messnetz ist vergleichsweise dicht. In Entwicklungsländern und inmitten der Ozeane klaffen dagegen große Datenlücken. Dafür sind rund 3000 Handelsschiffe sowie 3000 Flugzeuge mit Messfühlern ausgerüstet – und etwa 750 tauchende Bojen versorgen die Meteorologen mit Informationen über die Meerestemperatur von der Ozeanoberfläche bis in die Tiefe von 2000 Metern. Für ein vollständiges Bild der Atmosphäre sind allerdings geostationäre Satelliten unerlässlich.

Die gesammelten Daten werden schließlich in den riesigen Rechenzentren der nationalen Wetterdienste verarbeitet. Nach den Gesetzen der Physik wird aus dem aktuellen Zustand der Atmosphäre ein künftiger berechnet. Alles, was nicht gemessen werden kann, wird simuliert. Dazu gehören sehr kleinräumige und teilweise bis heute unverstandene Prozesse wie Verdunstung, Wolkenbildung, Konvektion und Einstrahlung. Die Annahmen können sich von Wetterdienst zu Wetterdienst unterscheiden, deshalb unterscheiden sich auch ihre Ergebnisse. Das hauseigene Modell des privaten Anbieters WetterOnline hat eine Maschenweite von zwei Kilometern, darüber hinaus stehen den Bonnern neun weitere Wettermodelle zur Verfügung. Alle Modelle haben ihre Stärken und Schwächen. Doch woher weiß der Meteorologe, welchem Modell er vertrauen soll, um einen Wetterbericht zu erstellen? Erfahrung und Ortskenntnis sind wichtig, aber darauf verlässt man sich in Bonn nicht allein. „Wir entscheiden jeden Tag neu, welcher Dienst die aktuelle Lage am besten trifft", sagt Matthias Habel. Das Modell wird also an der Wirklichkeit gemessen. Hat ein Modell die Wetterlage am genausten berechnet, fließt dieses Rechenergebnis in die App ein.

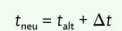
Die Qualitätsprüfung ist wichtig für jeden Wetterdienst. Zweitägige Vorhersagen liegen heute im Schnitt um lediglich 1,3 Grad daneben. Bei sechs Tagen beträgt die Abweichung etwa 2,5 Grad. Erst Abweichungen von mehr als 4,5 Grad werden als grobe Fehlprognosen gewertet. Die Auswahl bei WetterOnline folgt keiner Mehrheitsentscheidung. „Selbst wenn fünf Modelle Spätsommer voraussagen und nur eins Herbstwetter, vertrauen wir dem Modell, das am ehesten mit den Beobachtungen übereinstimmt", sagt er. Bei Vorhersagen von fünf bis sieben Tagen funktioniert diese Vorgehensweise ganz gut. Doch bei Prognosen von bis zu zwei Wochen, die von immer mehr Wetterseiten und Apps angeboten werden, wird einfach das Rechenmodell des GFS umgesetzt. Damit setzen die Anbieter jedoch ihr größtes Gut aufs Spiel: die Glaubwürdigkeit. Sieben bis maximal zehn Tage lassen sich heute – je nach Wetterlage einigermaßen seriös vorhersagen, alles was darüber hinausgeht, ist Humbug. […]

© Andreas Frey, Spektrum der Wissenschaft online

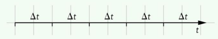
Methode der kleinen Schritte

Die Methode der kleinen Schritte ist kein analytisches, sondern ein numerisches Verfahren. Sie wird für Situationen angewendet, bei denen physikalische Größen voneinander abhängen und sich ständig gegenseitig beeinflussen.
Für einen freien Fall mit Reibung hängen z. B. Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung voneinander ab. Folgende Vereinfachungen werden bei der Kleinschrittmethode vorgenommen:

- Die Zeit wächst nicht kontinuierlich, sondern springt in kleinen Schritten Δt.



$t_{neu} = t_{alt} + \Delta t$

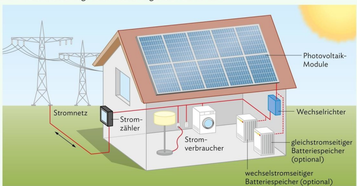


- Auch die Größen Kraft, Beschleunigung, Ort und Geschwindigkeit verändern sich sprunghaft. Zwischen zwei Sprüngen werden diese Größen näherungsweise als konstant angenommen.
- In jedem Schritt werden die aktuellen Werte von Ort und Geschwindigkeit aus den Größen des vorherigen Schrittes berechnet. Das Gleiche gilt auch für Kraft und Beschleunigung.

$v_{neu} = v_{alt} + \Delta v$ (mit $\Delta v = a_{neu} \cdot \Delta t$)
$x_{neu} = x_{alt} + \Delta x$ (mit $\Delta x = v_{neu} \cdot \Delta t$)

Photovoltaik

Die Photovoltaikanalge besteht aus folgenden Elementen:



Der Wechselrichter wandelt den bei der Photovoltaikanlage erzeugten Gleichstrom in den für das Stromnetz benötigten Wechselstrom um. Mithilfe von MPP-Trackern wird der Widerstand so geregelt, dass die Solarzelle am Maximal Power-Point (MPP) operieren kann.

Lösungen Selbsttest Kapitel A Kreisbewegung

1 a) Gegenüberstellung geradlinige Bewegung – Kreisbewegung:

Geradlinige Bewegung	Kreisbewegung
Geschwindigkeit: $v = \frac{\text{zurückgelegter Weg}}{\text{dafür benötigte Zeit}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ Einheit: $1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Bahngeschwindigkeit: $v = \frac{\text{zurückgelegter Kreisbogen}}{\text{dafür benötigte Zeit}} = \frac{2\pi r}{T}$ Einheit: $1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ Winkelgeschwindigkeit: $\omega = \frac{\text{zurückgelegter Winkel}}{\text{dafür benötigte Zeit}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T}$ Einheit: $1\,\frac{\text{rad}}{\text{s}} = 1\,\frac{1}{\text{s}}$
Weg: in der Zeit Δt zurückgelegte, geradlinige Strecke Δx in m	Weg: in der Zeit Δt zurückgelegter Kreisbogen $b = r \cdot \Delta\varphi$ in m Weg: In der Zeit Δt von der Verbindungsstrecke Kreismittelpunkt – Körper überstrichener Winkel in rad
v = konstant ⇔ Es wirkt keine Kraft auf den Körper.	$\vec{v}$ ändert dauernd die Richtung ⇔ Es wirkt stets eine Kraft $F \neq 0$ auf den Körper. Diese Kraft heißt Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$.

b) Es gilt der Trägheitssatz: Wirkt auf einen Körper keine Kraft (oder ist die Summe der auf ihn wirkenden Kräfte gleich null), so bleibt der Körper in Ruhe oder er bewegt sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit weiter.
Da ein Körper bei einer Kreisbewegung dauernd seine Richtung ändert, muss folglich eine Kraft auf ihn wirken. Diese Kraft ändert nicht den Betrag seiner Geschwindigkeit, sondern lenkt den Körper dauernd in Richtung Kreismittelpunkt ab.
Die Kraft heißt Zentripetalkraft $\vec{F}_{Zp}$. Sie zeigt in Richtung Kreismittelpunkt und steht stets senkrecht auf $\vec{v}$.

c) Berechnung der Winkelgeschwindigkeit:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{300 \cdot 2\pi}{60\text{ s}} = 31\,\frac{1}{\text{s}}$$

Berechnung der Bahngeschwindigkeit:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{300 \cdot 2\pi r}{60\text{ s}} = \frac{300 \cdot 2\pi \cdot 8{,}0\text{ m}}{60\text{ s}} = 251\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 250\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2 a) Für kleine Δs (bzw. auch für kleine Zeitintervalle Δt) entspricht der Weg, den der Körper zurücklegt, etwa dem Kreisbogen, der sich mit $v \cdot \Delta t$ berechnen lässt:
$\Delta s = v \cdot \Delta t$
Für Δv gilt: $\Delta v = a_{Zp} \cdot \Delta t$.
Beides in die Ausgangsformel eingesetzt, ergibt: $\frac{v \cdot \Delta t}{r} = \frac{a_{Zp} \cdot \Delta t}{v}$
Umgeformt erhält man: $a_{Zp} = \frac{v^2}{r}$
Mithilfe des zweiten Newtonschen Gesetzes ($F = m \cdot a$) erhält man
$F_{Zp} = m \cdot a_{Zp} = m \cdot \frac{v^2}{r}$
Aufgrund von $v = r \cdot \omega$ lässt sich dies umschreiben zu $F_{Zp} = m \cdot r \cdot \omega^2$.

b) Betrachtet man eine Kreisbewegung von außen, so stellt man fest, dass der Körper dauernd abgelenkt wird. Die Ursache für diese Ablenkung von einer - aufgrund des Trägheitssatzes - eigentlich geradlinigen Bahn ist die zum Kreismittelpunkt gerichtete Zentripetalkraft.
Ein rotierendes Bezugssystem ist ein beschleunigtes Bezugssystem. In einem beschleunigten Bezugssystem wirken Trägheitskräfte. Die Zentrifugalkraft ist die radial nach außen wirkende Trägheitskraft. Aufgrund seiner Trägheit „möchte" sich der Körper geradlinig tangential zur Kreisbewegung weiterbewegen. Betrachtet man dieses Bestreben als mitbewegter (rotierender) Beobachter, so stellt man fest, dass sich der Körper radial nach außen bewegen „möchte". Dies ist die Trägheitskraft im rotierenden Bezugssystem, die Zentrifugalkraft.

c) Betrachten wir die Situation von außen, so bleibt das Wasser im höchsten Punkt im Eimer, wenn die Zentripetalkraft mindestens so groß ist wie die Gewichtskraft, die auf das Wasser wirkt:
$F_{Zp} = F_G$
$m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot g$
Damit lässt sich die Winkelgeschwindigkeit ω berechnen: $\omega = \sqrt{\frac{g}{r}} = \sqrt{\frac{9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1{,}20\,\text{m}}} = 2{,}86\,\frac{1}{\text{s}}$
Die Rotationsfrequenz f erhält man mithilfe der Beziehung $\omega = 2\pi \cdot f$:
$f = \frac{\omega}{2\pi} = 0{,}455\,\text{Hz}$
Die Bahngeschwindigkeit des Eimers berechnet sich zu: $v = r \cdot \omega = 3{,}43\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$

3 a) Es gilt: $F_{Zp} = m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot \frac{v^2}{r}$
Damit ist die Zentripetalkraft abhängig von der Masse m des Körpers, dem Bahnradius r der Bewegung sowie der Winkelgeschwindigkeit ω, bzw. der Bahngeschwindigkeit v, des Körpers.
Die experimentelle Untersuchung der Abhängigkeit von m und r ist relativ problemlos möglich, die Untersuchung der Abhängigkeit von ω, bzw. v aufwändiger.

b) **Aufbau**
Sie benötigen einen Gegenstand, den Sie mit einer festen Winkelgeschwindigkeit in Rotation versetzen können (z. B. eine Fahrradfelge oder eine Salatschleuder).
Zusätzlich einen Kraftmesser (bzw. ein Handy mit Beschleunigungssensor), ein Maßband, verschiedene Massen, sowie eine Stoppuhr, um die Winkelgeschwindigkeit zu bestimmen.

Durchführung

Es wird nur jeweils eine Größe variiert, die anderen werden jeweils konstant gehalten. Damit wird der Zusammenhang zwischen der Zentripetalkraft F_{Zp} und der variierten Größe überprüft. Für die Überprüfung der Abhängigkeit der Zentripetalkraft von ω^2 bietet es sich an, ein ω^2-F_{Zp}-Diagramm zu erstellen. Hier sollte sich eine Ursprungsgerade ergeben.

c) Eine Einsatzmöglichkeit von elektronischen Sensoren wäre die Verwendung des Beschleunigungssensors eines Handys. Das Handy wird im Abstand r vom Rotationsmittelpunkt platziert, festgemacht und anschließend der Körper in Rotation versetzt. Der Beschleunigungssensor misst die Zentripetalbeschleunigung $a_{Zp} = r \cdot \omega^2$.
Eine weitere Möglichkeit des Einsatzes eines elektronischen Sensors wäre ein Fahrradtacho, den man beispielsweise am Rotationskörper „Fahrradfelge" montiert. Damit lässt sich die Winkelgeschwindigkeit der Fahrradfelge bzw. die Bahngeschwindigkeit des rotierenden Körpers bestimmen.

4 a) Beispiele für Kreisbewegungen:

Beispiel	Zentripetalkraft
Riesenrad	Zugkraft an den Verbindungsstreben
Fahrradreifen	Zugkraft an den Speichen
Kurvenfahrt eines Autos	Reibungskraft zwischen Reifen und Straße
Kurvenlauf eines Läufers	Reibungskraft zwischen Schuhen und Laufbahn
Bewegung des Monds um die Erde	Gravitationskraft zwischen Erde und Mond
Bewegung der Planeten und die Sonne	Gravitationskraft zwischen Sonne und Planeten

b) Die Haftreibungskraft bewirkt, dass das Auto der Richtung der eingelenkten Reifen folgt und eine Kreisbahn fährt. Gäbe es diese Haftreibungskraft nicht, wie z. B. (näherungsweise) auf einer Eisplatte, dann bewegt sich das Auto trotz eingelenkter Reifen aufgrund der Trägheit geradlinig weiter.
Es gilt:

$$F_{Zp} = F_R$$

$$\Leftrightarrow m \cdot \frac{v^2}{r} = \mu \cdot m \cdot g$$

$$\Leftrightarrow v = \sqrt{\mu \cdot g \cdot r}$$

c) Vor dem Schreiben der E-Mail sollten Sie sich zunächst Gedanken über die physikalischen Gesetze machen, die Sie für Ihre Stellungnahme benötigen. Für die maximale Geschwindigkeit v, mit der eine Kurve mit Radius r durchfahren werden kann, gilt:

$$v = \sqrt{\mu \cdot g \cdot r}$$

Die wichtigste Größe in dieser Situation ist der Reibungskoeffizient μ, da er sich als einzige der beteiligten physikalischen Größen geändert haben kann. Der Reibungsko-

effizient kann z. B. durch folgende Ursachen verkleinert werden:
Nässe; Staub/Dreck; Laub; Zustand der Reifen
Damit kann eine Geschwindigkeit, die am Vortag noch ausreichend war, die Kurve sicher zu passieren, am nächsten Tag bereits zu groß sein.
Die E-Mail könnte dann wie folgt aussehen:

Lieber Peter,
gerade habe ich von deinem Unfall erfahren, zum Glück ist dir nichts passiert! Ich habe mir mal ein paar Gedanken dazu gemacht, wie es überhaupt zu dem Unfall kommen konnte. Physikalisch betrachtet ist die Fahrt durch die Kurve eine Kreisbewegung, bei der die Zentripetalkraft in Form von Reibungskraft zwischen den Reifen und der Straße wirkt. Diese Kraft sorgt dafür, dass das Auto nicht aus der Kurve fliegt, sofern eine gewisse Geschwindigkeit nicht überschritten wird. Die Geschwindigkeit, die du dabei maximal haben darfst, lässt sich wie folgt berechnen: $v = \sqrt{\mu \cdot g \cdot r}$
Nun bist du ja gar nicht schneller gefahren als sonst und auch der Kurvenradius kann sich nicht geändert haben. Also muss die Haftreibungszahl für den Unfall verantwortlich sein! Hat es an dem Tag vielleicht geregnet? Dadurch würde sich die Haftreibungszahl zwischen Straße und Reifen verringern, die Reifen also schneller die Haftung verlieren als auf trockener Straße. Das war mir so auch nicht bewusst. Ich werde auf alle Fälle nächstes mal etwas langsamer durch die Kurven fahren, wenn die Straße nass oder von Laub bedeckt ist.
Ich wünsche dir noch gute Erholung von dem kleinen Schrecken und sehe dich nächste Woche beim Training. :-)

Beste Grüße
Frederik

5 a) Bei einem Himmelskörper der Masse m, der sich auf einer Kreisbahn um einen Körper der Masse M bewegt, wirkt die Gravitationskraft $\vec{F}_G$ als Zentripetalkraft.
Damit gilt:

$$F_{Zp} = F_G$$
$$\Rightarrow m \cdot r \cdot \omega^2 = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

b) Es gilt:

$$F_{Zp} = F_G$$
$$\Rightarrow m \cdot r \cdot \omega^2 = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Der Radius der Bewegung setzt sich zusammen aus dem Radius der Erde und der Höhe der Raumstation über der Erde: $r = r_E + 400\ \text{km} = 6371\ \text{km} + 400\ \text{km} = 6771\ \text{km}$.

Formen wir die Gleichung um nach ω, erhalten wir:

$$\omega^2 = G \cdot \frac{M}{r^3}$$
$$\Rightarrow \omega = \sqrt{G \cdot \frac{M}{r^3}} = \sqrt{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \cdot \frac{5{,}97 \cdot 10^{24}\ \text{kg}}{(6\,771\,000\ \text{m})^3}} = 1{,}132585 \cdot 10^{-3}\ \frac{1}{\text{s}}$$

Daraus folgt dann für die Umlaufdauer T:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$
$$\Leftrightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} = 5548\ \text{s} \approx 92{,}5\ \text{min}$$

Eine größere Höhe hätte eine größere Umlaufdauer T zur Folge. Außerdem würde eine Reise zur ISS länger dauern und mehr Energie benötigen.

Lösungen Selbsttest Kapitel B Schwingungen und Wellen

1 a) Beispiele für mechanische Schwingungen sind das Federpendel, das Fadenpendel, eine schwingende Gitarrensaite oder eine Stimmgabel.

Am Beispiel des Fadenpendels werden die charakteristischen Größen erklärt:

Amplitude s_{max}: größte Auslenkung, d. h. Strecke zwischen der Gleichgewichtslage und dem oberen Umkehrpunkt des schwingenden Körpers.

Periodendauer T: Dauer für eine vollständige Schwingung, d. h. Zeitspanne der Schwingung von oberem Umkehrpunkt wieder bis zum darauffolgenden oberen Umkehrpunkt. Es können aber auch zwei beliebige andere, jeweils gleiche Bewegungszustände der Bewegung betrachtet werden. So bietet sich beispielsweise auch der Durchgang durch die Gleichgewichtslage an.

Frequenz f: Zahl der Schwingungen pro Sekunde. Frequenz und Periodendauer sind über $f = \frac{1}{T}$ miteinander verbunden.

Rückstellkraft $\vec{F}_r$: Kraft, die den Körper in die Gleichgewichtslage zurücktreibt. Im Beispiel des Fadenpendels ist das die Schwerkraft.

Gleichgewichtslage: Stellung, in der sich alle Kräfte aufheben. Im Beispiel des Fadenpendels der tiefste Punkt. Hier heben sich die Schwerkraft und die Zugkraft des Fadens gegenseitig auf.

b) Beispiele für eine harmonische Schwingung: Federpendel, Fadenpendel, schwingende Flüssigkeitssäule im U-Rohr, Stimmgabel, ...

Kennzeichen einer harmonischen Schwingung:

- Die Rückstellkraft ist direkt proportional zur Auslenkung.
  Beim Federpendel ist die rücktreibende Kraft die Federkraft. Es gilt: $F = D \cdot s$.
- Im t-y-Diagramm ergibt sich ein sinusförmiger Verlauf.

  Es gilt: $s(t) = s_{max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$

c) Aus dem Diagramm lässt sich ablesen:

$s_{max} = 3$ cm; $T = \frac{4}{3}$ s (3 Schwingungen benötigen genau 4 s)

Damit erhält man: $f = \frac{1}{T} = 0{,}75 \frac{1}{s} = 0{,}75$ Hz

Die Gleichung für die Auslenkung lautet dann: $s(t) = 3\text{ cm} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\frac{4}{3}\text{s}} \cdot t\right)$

2 a) Mögliche Größen, von denen die Schwingungsdauer abhängen kann:
Masse m des Körpers; Länge l des Pendels; Größe $s(t = 0)$ der Auslenkung zu Beginn

b) Aufbau eines Fadenpendels mit Körper der Masse m und Pendellänge l.
Bei der Messung wird jeweils nur einer der drei in 2a) genannten Größen variiert, die beiden anderen werden konstant behalten. Die Schwingungsdauer T wird gemessen, indem die Zeit für 10 vollständige Schwingungen gemessen und dann der Mittelwert gebildet wird.
Bei der Messung der Abhängigkeit der Masse müssen T und l für jede Messung gleich sein. Analog müssen bei der Messung der Pendellänge T und m gleich sein.

c) Bei fehlerhaften Messgeräten oder falsch durchgeführten Messungen liegt eine systematische Abweichung vor, diese geht in der Regel immer in eine Richtung. Hier lässt sich die Messabweichung nicht quantitativ angeben.

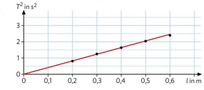
Bei zufälligen Messabweichungen gibt es unter anderem folgende Möglichkeiten:
Angabe des größten bzw. kleinsten Messwerts, der noch vertretbar ist. Beispiel: Die Strecke kann nur auf 1 mm genau gemessen werden, deshalb liegt der Messwert sicher zwischen 36 mm und 34 mm.
Berechnung der empirischen Standardabweichung $\sigma = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{(x_1 - \mu)^2 + \ldots + (x_n - \mu)^2}$
Diese Angabe ist mathematisch etwas genauer.

d) Tabelle 1:
Bestimmung des Mittelwerts:
$\mu = \frac{1}{5} \cdot (1{,}45\ \text{s} + 1{,}52\ \text{s} + 1{,}51\ \text{s} + 1{,}44\ \text{s} + 1{,}40\ \text{s}) = 1{,}46\ \text{s}$
Bestimmung der empirischen Standardabweichung:
$\sigma = \sqrt{\frac{1}{5-1} \cdot [(1{,}45 - 1{,}46)^2 + (1{,}52 - 1{,}46)^2 + (1{,}51 - 1{,}46)^2 + (1{,}44 - 1{,}46)^2 + (1{,}40 - 1{,}46)^2]}\ \text{s}$
$= 1{,}46\ \text{s}$

Tabelle 2: Quadratischer Zusammenhang zwischen Periodendauer und Pendellänge:

Pendellänge in m	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
***T* in s**	0,90	1,12	1,28	1,43	1,55
T^2 in s^2	0,81	1,25	1,64	2,04	2,40

l-T^2-Diagramm:



Die Ausgleichsgerade stellt in guter Näherung eine Ursprungsgerade dar. Damit ist graphisch gezeigt, dass gilt: $T^2 \sim l$.

3 a) Das Standardbeispiel einer Longitudinalwelle ist die Schallwelle. Weitere Beispiele sind Druckwellen bei einer Explosion oder bei einem Erdbeben. Bei einer Longitudinalwelle schwingen die einzelnen Teilchen parallel zur Ausbreitungsrichtung.
Beispiele für Transversalwellen sind eine Seilwelle oder eine La-Ola-Welle in einem Fußballstadion. Bei einer Transversalwelle schwingen die einzelnen Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

b) Beim Prinzip von Huygens ist jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer kreis- bzw. kugelförmigen Elementarwelle, die sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Wellenfront ausbreitet. Die Elementarwellen besitzen alle die gleiche Frequenz und Wellenlänge wie die erzeugende Welle. Die Elementarwellen überlagern sich und bilden so die neue Wellenfront.

Der Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit c, Frequenz f und Wellenlänge λ lautet: $c = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T}$.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist abhängig vom Medium, in dem sich die Welle ausbreitet, sowie von der Wellenlänge λ.

4 a) Unter Beugung versteht man, dass sich eine Welle hinter einem Hindernis auch etwas in den Schattenraum hinein ausbreitet.
Erklären lässt sich die Beugung mithilfe des Prinzips von Huygens: Jeder Punkt der Wellenfront ist Ausgang einer kreisförmigen Elementarwelle, folglich auch der Punkt der Wellenfront, der sich gerade an der Grenze zwischen Hindernis und Schattenraum befindet. Die an diesem Punkt entstehende kreisförmige Elementarwelle breitet sich auch in den Schattenraum hinein aus.

b) Das Superpositionsprinzip besagt, dass sich beim Aufeinandertreffen von zwei Wellen die Amplituden der beiden Wellen addieren. Danach laufen die beiden Wellen wieder mit ihren vorherigen Amplituden weiter, so als hätte es die zweite Welle nicht gegeben.
Bei konstruktiver Interferenz treffen zwei gleiche Wellen so aufeinander, dass ein Wellenberg der einen Welle auf einen Wellenberg der zweiten Welle, bzw. ein Wellental der einen Welle auf ein Wellental der zweiten Welle trifft. In diesem Fall verdoppelt sich die Amplitude und es entsteht ein doppelt so großer Wellenberg, bzw. ein doppelt so großes Wellental.
Bei destruktiver Interferenz trifft ein Wellenberg der einen Welle auf ein Wellental einer zweiten, gleichen Welle. Damit subtrahieren sich die beiden Amplituden und die Wellen löschen sich gegenseitig aus.

c) Damit an einem Ort P ein Maximum der Interferenz entsteht, muss Δs ein Vielfaches der Wellenlänge λ sein: $\Delta s = k \cdot \lambda$. Für das Maximum 1. Ordnung gilt folglich: $\Delta s = \lambda$.
Somit gilt: $\Delta s = \lambda = 0{,}60\ \text{m}$
Mit $c = \lambda \cdot f$ erhält man: $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{343\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0{,}60\ \text{m}} = 573\ \text{Hz}$

5 a) Das Bild ist ein typisches Interferenzbild. Die hellen Streifen stellen die Interferenzmaxima, die dunklen Streifen die Interferenzminima dar.
Ein Interferenzmaximum ergibt sich, wenn der Wegunterschied Δs der Strecken vom Auftreffpunkt der Lichtwellen auf dem Schirm zu den beiden Spaltmitten ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ ist: $\Delta s = k \cdot \lambda$. Ein Minimum erhält man, wenn gilt: $\Delta s = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$.
In der Mitte des Schirms befindet sich das Maximum 0-ter Ordnung, symmetrisch nach links und rechts die Maxima höherer Ordnung.

b) Je größer die Wellenlänge des auf den Spalt treffenden Lichts ist, desto größer ist der Wegunterschied, der für eine konstruktive Interferenz benötigt wird. Die Maxima liegen dann also weiter auseinander. Da rotes Licht eine größere Wellenlänge (bzw. blaues Licht eine kürzere Wellenlänge) als gelbes Licht besitzt, vergrößert sich bei rotem Licht (bzw. verkleinert sich bei blauem Licht) der Abstand zwischen den einzelnen Maxima in der Abbildung.

6 Vergleich des Photonenmodells mit dem Wellenmodell des Lichts:

	Erklärung des Lichts	Eigenschaften
Photonenmodell	Licht besteht aus einem Strom aus einzelnen Teilchen, den Photonen.	Die Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit; Energie und Impuls der Photonen hängen von der Farbe des Lichts ab.
Wellenmodell	Licht breitet sich wellenförmig aus. Hierbei kann jeder Punkt der Wellenfront als Ausgangspunkt einer kreisförmigen Elementarwelle angesehen werden.	Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Lichtgeschwindigkeit, die Wellenlänge beschreibt die Farbe des Lichts und die Amplitude beschreibt die Lichtintensität.

Mit dem Photonenmodell lässt sich beispielsweise die quantenhafte Absorption und Emission von Licht erklären. Die Energiedifferenz in einem Atom entspricht der passenden Energie eines Photons. Trifft ein solches Photon auf das Atom, wird das Atom energetisch angeregt und das Photon wird absorbiert. Ein energetisch angeregtes Atom kann zu einem energetisch niedrigeren Zustand zurückkehren und sendet dabei ein Photon aus, dessen Energie genau der Differenz der Energiestufen des Atoms entspricht.

Mit dem Wellenmodell lässt sich das Phänomen der Interferenz bei einem Doppelspalt erklären. Die beiden Wellen, die jeweils von den beiden Spalten ausgehen, überlagern sich hinter dem Spalt. Treffen dabei zwei Wellenberge oder zwei Wellentäler aufeinander, so verdoppelt sich die Amplitude, ein Interferenzmaximum entsteht. Treffen ein Wellenberg und ein Wellental aufeinander, so löschen die beiden Wellen gegenseitig aus, ein Interferenzminimum entsteht.

1 a) Im *geozentrischen Weltbild* geht man davon aus, dass die Erde im Mittelpunkt des Universums steht. Die Erde ruht und wird von der Sonne, dem Mond, den Planeten und den Sternen umkreist.
Die Schwerkraft der Erde sowie die von der Erde aus zu beobachtenden Bewegungen der Himmelskörper scheinen dieses Weltbild zu bestätigen. Es passt zusätzlich gut zur damaligen religiösen Meinung, dass der Mensch die Krönung der Schöpfung sei und deshalb im Mittelpunkt des Universums stehen muss.

Im *heliozentrischen Weltbild* befindet sich die Sonne im Zentrum des Universums. Die Erde sowie die anderen Planeten bewegen sich um die Sonne. Der Mond bewegt sich um die Erde und die weit entfernten Sterne sind ruhende Fixsterne. Mit diesem Weltbild lässt sich beispielsweise die von der Erde aus beobachtete Schleifenbahn des Mars sinnvoll erklären.

b) Als *Kopernikanische Wende* bezeichnet man den vom deutsch-polnischen Astronomen Nikolaus Kopernikus (1473 – 1543) eingeleiteten Wandel vom geozentrischen hin zum heliozentrischen Weltbild. Darüber hinaus bezeichnet dieser Begriff zusätzlich ein Umdenken beim Erlangen wissenschaftlicher Erkenntnisse sowie einen Wandel im menschlichen Bewusstsein und in der Gesellschaft – etwas weg von der Religion und etwas stärker hin zur Wissenschaft. Im heliozentrischen Weltbild steht der Mensch nicht mehr im Mittelpunkt des Universums.

c) Das heliozentrische Weltbild entstand im 16. Jahrhundert. Aufgrund der in den darauffolgenden Jahrhunderten erlangten wissenschaftlichen Erkenntnisse entstand das moderne Weltbild. In diesem gibt es keinen ausgewiesenen Mittelpunkt des Universums. Das Universum entstand vor etwa 14 Mrd. Jahren durch den Urknall und expandiert seitdem. Die Sonne ist ein Stern im äußeren Bereich unserer Milchstraße; die Milchstraße ist nur eine von etwa 2 Billionen Galaxien.

2 a) *1. Keplersches Gesetz*: Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen. In einem gemeinsamen Brennpunkt befindet sich die Sonne.

2. Keplersches Gesetz: Die Verbindungslinie Sonne-Planet überstreicht in gleich großen Zeitintervallen Δt gleich große Flächen.

3. Keplersches Gesetz: Die Quadrate der Umlaufdauern T zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen a ihrer Bahnen.
In Formelschreibweise: $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$

b) Man nimmt als Planet 1 die Erde: $T_1 = 365$ Tage, $a_1 = 149{,}6$ Mio km.
Diese Daten müssen für das Vorgehen bekannt sein.
Vom zu untersuchenden Planeten 2 muss man mittels Beobachtung seine Umlaufdauer T_2 ermitteln. Mithilfe des dritten Keplerschen Gesetzes lässt sich dann seine große Halbachse a_2 berechnen:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \Rightarrow a_2 = \sqrt[3]{\frac{T_2^2}{T_1^2} \cdot a_1^3}$$

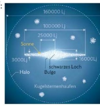
3 a) ① Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun
② Gesteinsplaneten: Merkur, Venus, Erde, Mars
Gasplaneten: Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun
③ Absteigende Größe: Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun, Erde, Venus, Mars, Merkur

b) Unsere Sonne entstand vor etwa 4,3 Mrd. Jahren durch die Verdichtung einer großen Gaswolke aufgrund der eigenen Gravitationskraft.
Als Folge der hohen Temperatur und des hohen Drucks im Inneren fusioniert Wasserstoff zu Helium. Dabei wird Energie in Form von Licht und Wärme frei.
In etwa 5 Mrd. Jahren ist der „Brennvorrat" im Kern aufgebraucht. Der Fusionsvorgang verschiebt sich nach außen in die äußeren Schichten. Dadurch bläht sich die Sonne auf und wird zu einem sogenannten Roten Riesen. Der Radius vergrößert sich auf das 100-fache des jetzigen Radius.
Im Endstadium bläst die Sonne die äußere Hülle weg. Der hochverdichtete Kern kühlt ab und wird zu einem sogenannten Weißen Zwerg von ungefähr der Größe der Erde.

c) Bilder unserer Milchstraße:
„Von oben":



„Von der Seite":

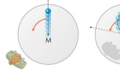


Die Milchstraße ist eine Balkenspiralgalaxie mit einem Durchmesser von etwa 100 000 Lichtjahren. In der Milchstraße befinden sich ca. 100 Mrd. Sterne. Sie ist umgeben von einem kugelförmigen galaktischen Halo, in dem sich zahlreiche einzelne Sterne und Kugelsternhaufen befinden. In der Mitte der Milchstraße befindet sich ein sehr massereiches schwarzes Loch. Die Spiralarme der Milchstraße rotieren um dieses Zentrum. Unsere Sonne bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 220 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ um das Zentrum. Das ist schneller, als sich aus dem 3. Keplerschen Gesetz und der bekannten Masse der Milchstraße ergeben würde. Die Astronomen haben deshalb die Existenz einer sogenannten „Dunklen Materie" postuliert, deren Gravitationskraft die Sonne stärker beschleunigt.

4 a) Seit den 1920er Jahren weiß man, dass sich die Galaxien des Universums voneinander entfernen: Das Universum dehnt sich aus. Es gibt keinen ausgezeichneten Punkt, von dem sich alle Galaxien wegbewegen würden, folglich keinen Mittelpunkt des Universums. Die Geschwindigkeit einer Galaxie ist umso größer ist, je weiter sie von uns entfernt ist. Das lässt sich mit der Ausdehnung des Raums erklären, wie bei einem Luftballon. Außerdem nimmt die Expansionsgeschwindigkeit immer weiter zu. Für diese beschleunigte Expansion ist Energie nötig. Da man bisher allerdings nicht erklären kann, woher diese Energie stammt, wird sie als „Dunkle Energie" bezeichnet.

b) Die Urknalltheorie besagt, dass sich das Universum anfangs in einem Punkt mit unendlich hoher Energiedichte konzentriert und dann schlagartig ausgedehnt hat.
Eine der Voraussagen dieser Theorie ist, dass überall im Universum eine Wärmestrahlung messbar sein müsste, die einige Jahrtausende nach dem Urknall entstanden ist. Diese Strahlung ist heutzutage tatsächlich durch Satellitenmessungen nachweisbar und wird als kosmische Hintergrundstrahlung bezeichnet. Diese Hintergrundstrahlung besitzt eine nur sehr geringe Schwankung der Wellenlängen und weist hinsichtlich ihrer Temperatur einen Mittelwert von 2,7 K auf.

1 a) Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, auf das keine Kraft von außen wirkt und das nicht beschleunigt wird. In einem Inertialsystem gelten die Newtonschen Gesetze, insbesondere der Trägheitssatz. Ein Inertialsystem ist entweder in Ruhe oder bewegt sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit. Ein Beispiel dafür wäre ein Auto, das mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden und ebenen Straße fährt.
Kein Inertialsystem ist ein rotierendes System. Betrachtet man beispielsweise eine Kugel, die sich von außen betrachtet in diesem System geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit radial nach außen bewegt, so ist diese Bewegung für einen mitbewegten Beobachter gekrümmt. Folglich ist der Trägheitssatz für ihn nicht mehr erfüllt (siehe Skizze).



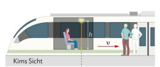
b) *Postulat 1*: Die physikalischen Gesetze sind in jedem Inertialsystem gleich. Anhand der physikalischen Gesetze lässt sich folglich nicht unterscheiden, ob das Bezugssystem ruht oder sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit bewegt.

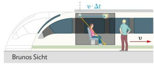
c) *Postulat 2*: Die Lichtgeschwindigkeit ist in jedem Inertialsystem gleich groß. Wenn man sich in einem Inertialsystem befindet und die Ausbreitung des Lichts in einem zweiten Inertialsystem beobachtet, misst man immer die gleiche Lichtgeschwindigkeit, unabhängig von der relativen Bewegung der Inertialsysteme zueinander.

2 Für Kim ruht der Wagon, in dem sie sich befindet; die beiden Uhren sind gleich weit von ihr entfernt. Folglich trifft für sie der Lichtimpuls gleichzeitig die beiden Uhren und die Uhren starten in ihrem Inertialsystem gleichzeitig.
Bruno registriert für den ausgesendeten Lichtimpuls die gleiche Geschwindigkeit wie Kim. Aufgrund der Bewegung des Zugs bewegt sich die hintere Uhr auf den nach hinten ausgesendeten Teil des Lichtimpulses zu, die vordere Uhr bewegt sich dagegen von dem Teil des nach vorne ausgesendeten Lichtimpuls weg. Insofern wird für Bruno die hintere Uhr zuerst vom Lichtimpuls getroffen, danach erst die vordere Uhr. Die beiden Uhren starten im Inertialsystem Bahnsteig also nicht gleichzeitig.

3 a) Die Zeitdilatation besagt, dass die Zeit im Inertialsystem des Geschehens langsamer vergeht als in einem Inertialsystem, das sich relativ dazu bewegt. Die Zeit ist demnach keine absolute Größe, sondern hängt vom Bezugssystem ab.

Folgendes Gedankenexperiment verdeutlicht das:
Zwischen zwei Spiegeln am Boden und an der Decke eines fahrenden Zugs wird ein Photon dauernd hin und her reflektiert. Für eine Reflexion vom Boden zur Decke und zurück zum Boden misst ein mitfahrender Beobachter (Kim) die Zeitspanne Δt_0. Die vom Photon zurückgelegte Strecke ist für diesen Beobachter zwei Mal die Entfernung Boden-Decke (linkes Bild).
Für einen am Bahnsteig stehenden Beobachter (Bruno) legt das Photon aufgrund der Weiterbewegung des Zugs eine längere Strecke zurück (rechtes Bild). Da sich für ihn das Photon aber mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt, dauert für ihn dieser Vorgang eine längere Zeitspanne $\Delta t > \Delta t_0$.





b) Die Längenkontraktion besagt, dass Körper (bzw. allgemein Strecken), die sich relativ zu einem Beobachter schnell bewegen, für diesen in Bewegungsrichtung verkürzt erscheinen.
Folgendes Gedankenexperiment verdeutlicht das:
Kim befindet sich in einem mit hoher, konstanter Geschwindigkeit fahrenden Zug, während Bruno draußen am Bahnsteig steht. Zwischen zwei Spiegeln an den beiden Enden des Zugabteils wird ein Photon hin und her reflektiert. Aus Kims Sicht muss das Photon genau die Strecke zurücklegen, die der Länge des Zugabteils entspricht. Das Photon bewegt sich dabei mit Lichtgeschwindigkeit.
Wenn Bruno von außen die vom Photon zurückgelegte Strecke betrachtet, so stellt sich die Situation für ihn etwas anders dar: Da sich der Zug bewegt, entfernt sich auch das Ende des Zugabteils vom Photon. Das Photon muss also zusätzlich die Strecke zurücklegen, um die sich der Zug in der Zeit fortbewegt hat. Auch aus Brunos Sicht bewegt sich das Photon, gemäß den Einsteinschen Postulaten, aber mit Lichtgschwindigkeit. Das Photon legt also unterschiedlich lange Strecken zurück, obwohl es sich jeweils mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt. Dieser Widerspruch lässt sich dadurch aufklären, sich für die im schnellen Zug fahrende Kim der Raum anders verhält als für den ruhenden Betrachter Bruno.

4 a) Die Äthertheorie war noch bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts weit verbreitet. Sie liefert eine Erklärung dafür, dass sich Licht im Vakuum des Weltraums ausbreiten kann: Das Universum ist von einer unsichtbaren Substanz durchsetzt, dem Äther. Er dient dem Licht als Ausbreitungsmedium (ähnlich wie die Luft für den Schall) und bewegt sich, laut der Theorie, in Relation zu Sternen und Planeten nicht; der Äther ist also unsichtbar und ruhend.
Das Michelson-Morley-Experiment sollte die Theorie bestätigen: Aus einer Lichtquelle wird Licht auf einen halbdurchlässigen Spiegel gestrahlt. Ein Teil des Lichts durchdringt den Spiegel, ein anderer Teil wird senkrecht dazu abgelenkt. Das Licht wird so also auf zwei Pfade aufgeteilt.
Das Experiment war so angelegt, dass das Licht wieder reflektiert wird und am Ende beide Pfade wieder zusammengeführt werden. Strahlt man das Licht nun in Bewegungsrichtung der Erde (Pfad 1), müsste es eine Art „Ätherwind" spüren, ähnlich wie bei einem Flugzeug, das sich relativ zur ruhenden Luft bewegt. Das Licht wird also „ausgebremst". Bewegt sich das Licht im Experiment dagegen senkrecht zur Bewegungsrichtung der Erde (Pfad 2), dürfte es keinen Ätherwind spüren, da in diese Richtung betrachtet der Äther ruht. Das Experiment sollte also nachweisen, dass das Licht für den einen Pfad etwas länger benötigt als für den anderen.

b) Bei dem Michelson-Morley-Experiment wurde, entgegen der Erwartung, festgestellt, dass das Licht für beide Pfade genau die gleiche Zeit benötigt. Demnach kann also kein Äther existieren, weil sonst das Licht auf dem einen Pfad ausgebremst worden wäre. Entgegen des klassischen Verständnisses benötigt das Licht also kein Ausbreitungsmedium, um sich fortzubewegen. Das ergibt sich auch aus Einsteins Postulaten: Licht bewegt sich in jedem Inertialsystem mit der gleichen Geschwindigkeit, unabhängig von der relativen Bewegung der Inertialsysteme zueinander.

5 Bei der Deutschen Physik (oder auch arischen Physik) handelt es sich um eine nationalsozialistisch geprägte Lehre, die einige deutsche Physiker in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts vertraten. Hierbei wurde die Physik mit rassistischen, v. a. antisemitischen Ansichten und Gedankengut vermischt. Die Deutsche Physik lehnte insbesondere die Ergebnisse Albert Einsteins ab; nicht nur aufgrund wissenschaftlichen, sondern insbesondere aus antisemitischen Gründen.
Das Beispiel der Deutschen Physik zeigt, welchen Einfluss gesellschaftliche und politische Entwicklungen auf die Wahrnehmung und Akzeptanz wissenschaftlicher Erkenntnisse haben kann:
Erkenntnisse und Aussagen von jüdischen Wissenschaftlern wurden als falsch, zu wenig anschaulich oder als wissenschaftliche Sackgassen bewertet - oder wurden erst gar nicht veröffentlicht. Jüdische Wissenschaftler wurden entlassen und zentrale Positionen wissenschaftlicher Institute wurden durch parteikonforme Personen besetzt. Die Wissenschaft wurde vom Staat institutionalisiert.

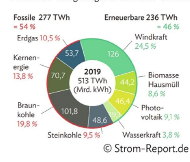
1 a) Ist die Prozessrealisierung zeitlich umkehrbar, so nennt man diesen Prozess oder diesen Vorgang reversibel. Kann der Prozess oder der Vorgang nur in einer Richtung ablaufen, so nennt man diesen Prozess irreversibel.
Ein Beispiel wäre der Vergleich des Fallenlassens einer Knetkugel und eines idealen Gummiballs. Die Knetkugel bleibt am Boden liegen, die zu Beginn vorhandene Höhenenergie wurde in innere Energie umgewandelt, die sich nicht mehr wieder in Höhenenergie umwandelt. Dem Prozess wurde Energie entzogen, man spricht von Energieentwertung. Der ideale Gummiball dagegen erreicht wieder die Ausgangshöhe. Das Fallen nach unten wurde umgekehrt in ein Fliegen nach oben.

b) Der Wirkungsgrad η ist definiert als Quotient zwischen genutzter Energie (bzw. genutzter Leistung) und aufgewendeter Energie (bzw. aufgewendeter Leistung):

$$\eta = \frac{\Delta E_{\text{nutz}}}{\Delta E_{\text{auf}}} = \frac{P_{\text{nutz}}}{P_{\text{auf}}}$$

Bei den verschiedenen Kraftwerkstypen finden immer Energieumwandlungen statt. Bei all diesen Prozessen wird immer ein Teil der Energie in nichtgenutzte innere Energie umgewandelt (es findet also eine Energieentwertung statt), sodass stets $\Delta E_{\text{nutz}} < \Delta E_{\text{auf}}$ und damit $\eta < 1$ gilt.

2 a) Das rechte Diagramm zeigt den sogenannten Strommix des Jahres 2019, d. h. die Anteile der Energieträger an der Netto-Stromerzeugung:



b) Potenziale der einzelnen Energieträger:

Energie-träger	Potenzial	Umweltaspekt	Verfügbarkeit
Stein-kohle	leichte Förderung und Transport; relativ hoher Energiegehalt	sehr klimaschädlich, da große Freisetzung von CO_2	die leicht förderbaren Vorräte reichen noch etwa hundert Jahre
Braun-kohle	leichte Förderung; Große Vorkommen in Deutschland; niedrigerer Energiegehalt als Steinkohle	sehr klimaschädlich, da große Freisetzung von CO_2; umweltschädlicher Tagebau	noch etwa hundert Jahre
Erdöl	hoher Energiegehalt; Verwendung nicht nur zur Energieerzeugung	beim Verbrennen große Freisetzung von CO_2	kaum Vorkommen in Deutschland; die weltweiten Vorkommen reichen noch ca. 50 Jahre
Erdgas	hoher Energiegehalt	beim Verbrennen große Freisetzung von CO_2	keine nennenswerten Vor-kommen in Deutschland; die weltweiten Vorkommen reichen noch ca. 100 Jahre
Kern-energie	sehr hoher Energiegehalt	keine Freisetzung von CO_2; Problematik des radioakti-ven Abfalls und der Frei-setzung von Radioaktivität bei einem GAU	keine nennenswerten Vor-kommen in Deutschland; die weltweiten Vorkommen reichen noch ca. 200 Jahre
Wind-energie	bis zu 1200 GW an Windenergieleistung in Deutschland möglich; aktuell: 30 GW	regenerative Energiequelle; evtl. Zerstörung des Landschaftsbildes	unterschiedliche Wind-geschwindigkeiten in den verschiedenen Regionen
Wasser-kraft	aktuell: 7300 Wasser-kraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 5600 MW in Deutschland; Steigerung der Leistung ist v. a. durch Modernisierung der Anlagen möglich	regenerative Energiequelle; Zerstörung der natürlichen Flussverläufe	Wasserkraft an den großen Flüssen ist ziemlich ausgeschöpft; problematisch sind schwankende Nieder-schlagsmengen aufgrund der Klimaerwärmung
Sonnen-energie	viele Flächen, die man noch nutzen kann; Probleme: Speicherung der Sonnenenergie und niedriger Wirkungsgrad einer Solarzelle	regenerative Energiequelle; Beachtung der Amor-tisation: Zur Herstellung der Solarmodule wird Energie benötigt	keine Sonne in der Nacht; schwankende Energie-versorgung aufgrund instabilen Wetters
Bio-masse	Biomasse wird genutzt zur Wärmegewinnung, zur Gewinnung von Methan, zur Gewinnung von Biotreibstoff	nachwachsender Rohstoff; Problematik der Ertragsstei-gerung durch Düngung und der resultierenden Umwelt-belastung (z. B. Nitrat im Trinkwasser)	Nutzung der vorhandenen Anbauflächen zur Nahrungsgewinnung oder zur Energiegewinnung?

c)

Energieversorgung	Vorteile	Nachteile
regional / dezentral	geringe Netzausbaukosten; größere Beteiligung der Bürger; Steigerung der regionalen Wertschöpfung	Abhängigkeit vom Potenzial der Region; schwierigeres Reagieren auf Energieschwankungen
global	Ausschöpfen der Vorteile der verschiedenen Regionen; bessere Reaktion auf Energieschwankungen in einzelnen Regionen	Abhängigkeit vom globalen Markt; Problematik der eventuell instabilen politischen Lage in wichtigen Regionen
zentral	Bau großer und effektiver Anlagen möglich; bessere Reaktion auf Energieschwankungen möglich	teurer Netzausbau nötig

3 a) Eine Nutzwertanalyse dient dazu, bei einer gegebenen Fragestellung zu einer fundierten Entscheidung zu kommen. Dazu werden zuerst alle relevanten Argumente nach vorgegebenen Kriterien gesammelt. Diese werden dann zuerst objektiv hinsichtlich der Erfüllung der Kriterien bepunktet und anschließend nach einem selbstgewählten Punktesystem gewichtet.

b) Die folgenden Aspekte sind sicherlich hinsichtlich der Fragestellung „Installation einer Photovoltaikanlage auf dem eigenen Hausdach?" relevant:
- Preis der Anlage
- mögliche Größe der Anlage
- Neigung und Orientierung des Dachs
- Einspeisevergütung
- jährliche Sonneneinstrahlung
- Beschattung durch Bäume, Nachbarhäuser, usw.
- jährlicher Stromverbrauch
- zusätzlicher Einbau eines Stromspeichers ja/nein
- Dauer bis Amortisierung

4 Mögliche Energieeinsparpotenziale:
- Fahrrad statt Auto
- verstärktes Benutzen der öffentlichen Verkehrsmittel
- kein unnötiges Laufen lassen des Computers und anderer Elektrogeräte
- Ersetzen von v. a. älteren Elektrogeräten durch Geräte mit höherem Wirkungsgrad
- Herunterdrehen der Heizung
- Verzicht auf Flugreisen

1. Hilfestellungen

S. 19, Arbeitsauftrag 6

Rufen Sie sich ins Gedächtnis, um welche Achse die Erde rotiert und welche Bedeutung der Äquator dabei hat.

S. 25, Arbeitsauftrag 5

Wenn ein Reifen eine Unwucht hat, ist seine Masse (z. B. durch ungleichmäßige Abnutzung des Gummis) nicht mehr symmetrisch zur Rotationsachse verteilt. Der Reifen rotiert dann also nicht mehr wie gewünscht symmetrisch zur Rotationsachse des Autos. Beim Auswuchten wird gezielt eine Masse an den Reifen angebracht (angeschweißt oder angeklebt), um die Unwucht wieder auszugleichen.

S. 39, Arbeitsauftrag 5

Zu Aufgabe a): Orientieren Sie sich an der Musteraufgabe.

S. 41, Arbeitsauftrag 4

Für alle Körper auf der Kreisbahn wirkt die Gravitationskraft als Zentripetalkraft.

S. 57, Arbeitsauftrag 4

Betrachten Sie das rechtwinklige Dreieck mit Hypotenuse F_G und Kathete F_r.
Man erhält eine konstante Beschleunigung a.
Unterteilen Sie die Bewegung der Kugel, ausgehend vom Punkt B, bis sie wieder zu B zurückkehrt, in vier Teilbereiche.

S. 165, Arbeitsauftrag V2f

Sehen Sie sich die Kennlinien zu den verschiedenen Bestrahlungsstärken an und beurteilen Sie, wie die Leerlaufspannung und die Kurzschlussstromstärke davon abhängen.

S. 187, Arbeitsauftrag M2c

Berechnen Sie zunächst den Grenzwinkel für einen sehr geringen Unterschied zwischen den Brechungsindizes n_1 und n_2.

S. 19, Arbeitsauftrag 6

Denken Sie daran, dass sich die Erde in Längen- und Breitengrade unterteilen lässt. Überlegen Sie sich dann, wie sich Bahn- und Winkelgeschwindigkeit ändern, wenn man sich entlang der Längen- bzw. der Breitengrade bewegt.

S. 25, Arbeitsauftrag 5

Berechnen Sie die Zentripetalkraft, die nun bei dem Reifen „fehlt". Beachten Sie bei Ihrer Erläuterung, dass die anderen drei Reifen des Autos „normal" laufen.

S. 39, Arbeitsauftrag 5

Zu Aufgabe c): Wählen Sie einen Lösungsansatz, bei dem Sie die Fallbeschleunigung von Merkur und Mars gleichsetzen.

S. 41, Arbeitsauftrag 4

Stellen Sie die entsprechende Gleichung der Kräfte auf und formen Sie sie so um, dass sich der angegebene Term ergibt.

S. 57, Arbeitsauftrag 4

Die Kugel wird vom Punkt *B* ausgehend mit der Beschleunigung *a* aus der Ruhe beschleunigt. Überlegen Sie sich die zugehörigen Bewegungsgleichungen. Berechnen Sie damit die Zeit t_{Smax}, die die Kugel für die Strecke s_{max} benötigt.

S. 165, Arbeitsauftrag V2f

Man erkennt grob eine lineare Abhängigkeit der Kurzschlussstromstärke von der Bestrahlungsstärke und eine geringe Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Bestrahlungsstärke. Hinweis: Streng genommen muss zwischen der Bestrahlungsstärke gemessen in $\frac{W}{m^2}$ und der Beleuchtungsstärke gemessen in lx unterschieden werden. Die obigen Überlegungen gelten eigentlich für die Beleuchtungsstärke. Überlegen Sie nun, was das für die Leistung am MPP bedeutet, wenn sich *U* kaum ändert und *I* dagegen mit der Beleuchtungsstärke anwächst.

S. 187, Arbeitsauftrag M2c

Überlegen Sie sich, was passieren würde, wenn es kein „Cladding" geben würde und das Quarzglas direkt an die Plastikschutzhülle (mit deutlich unterschiedlichem Brechungsindex im Vergleich zum „Core") grenzen würde.

S. 19, Arbeitsauftrag 6

Beachten Sie, dass die Bahngeschwindigkeit vom Radius der Bahn abhängt, die Winkelgeschwindigkeit jedoch nicht!

S. 25, Arbeitsauftrag 5

Der Vibrationsalarm des Handys soll Aufmerksamkeit erregen. Überlegen Sie sich, wie das durch die unregelmäßige Rotation gelingen kann, die durch die Unwucht entstehen kann.

S. 39, Arbeitsauftrag 5

Zu Aufgabe c): Drücken Sie die Fallbeschleunigungen durch ähnliche Gleichungen aus, wie Sie in der Musteraufgabe verwendet werden. Lösen Sie dann nach dem mittleren Radius des Merkurs auf und setzen Sie das Verhältnis der beiden Planetenmassen ein.

S. 41, Arbeitsauftrag 4

Untersuchen Sie, ob sich die andere Seite der Gleichung für verschiedene Körper verändert.

S. 57, Arbeitsauftrag 4

Eine komplette Schwingung besteht aus...
- der beschleunigten Bewegung von *B* bis zum untersten Punkt,
- der analogen abbremsenden Bewegung vom untersten Punkt bis zum Punkt *A*,
- der beschleunigten Bewegung vom Punkt *A* bis zum untersten Punkt,
- und aus der abbremsenden Bewegung vom untersten Punkt bis zum Punkt *B*.

Damit lässt sich der Zusammenhang zwischen der Zeit t_{Smax} und der Schwingungsdauer T herleiten.
Aufgrund der Bewegungsgleichung $s(t) = \frac{1}{2}at^2$ ist im t-s-Diagramm jeder der vier Teile der Schwingung ein Parabelast.

S. 165, Arbeitsauftrag V2f

Da die Bestrahlungsstärke (genauer: Beleuchtungsstärke) einen wesentlichen Einfluss auf den Kurzschlussstrom hat, gilt grob: I ~ Bestrahlungsstärke. Die Spannung am MMP ändert sich aber kaum, folglich gilt wegen $P = U \cdot I$, dass die Leistung P_{MPP} am MMP zur Stromstärke I und diese wiederum zur Bestrahlungsstärke (genauer: Beleuchtungsstärke) proportional ist:

$$P_{MPP} \sim I \sim \text{Bestrahlungsstärke}$$

Die Leistung am MMP ist also (grob) proportional zur Bestrahlungsstärke (bzw. Beleuchtungsstärke).

S. 187, Arbeitsauftrag M2c

Überlegen Sie sich, was ein Eintrittswinkel von fast 0° in Hinblick auf Stör-Lichtsignale bedeutet.

Ordnungsstrukturen der Physik

Sie haben in den letzten Schuljahren eine große Zahl von physikalischen Inhalten und Arbeitsweisen kennengelernt. Dabei konnten Sie feststellen, dass es zwischen scheinbar ganz unterschiedlichen Bereichen der Physik trotzdem Verbindungen gibt. Die Energieerhaltung gilt beispielsweise nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrizitätslehre und in der Kernphysik. Und die Erstellung eines Versuchsprotokolls in der Mechanik gleicht von der Struktur her dem eines Versuchsprotokolls in der Elektrizitätslehre. Solche Verbindungen können somit helfen, die zu lernenden Gegenstände und die anzuwendenden Methoden zu strukturieren und auf diese Weise den Überblick zu behalten. So vereinfachen sie das Lernen: Was Sie einmal eingeübt haben, können Sie ohne große Mühe auf andere Gebiete übertragen. Die folgenden beiden Abschnitte zeigen solche Ordnungsstrukturen.

Inhalte (Gegenstandsbereiche)

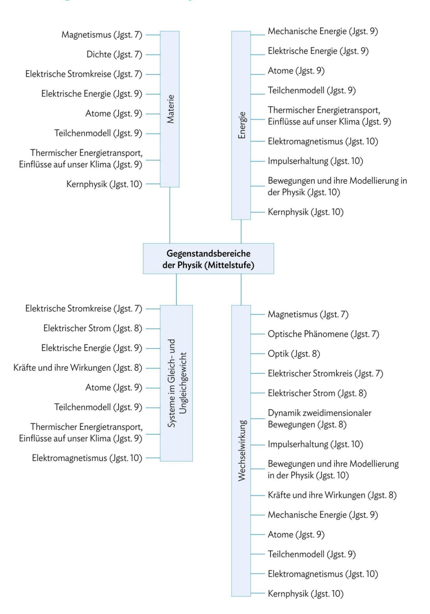
Die physikalischen Inhalte der letzten Jahrgangsstufen ließen sich gut in vier sogenannte Gegenstandsbereiche zusammenfassen. In der Mittelstufe wurden diese recht konkret mit den Begriffen „Energie“, „Materie“, „Wechselwirkung“ und „Systeme“ bezeichnet. In der Oberstufe, in die Sie nun eingetreten sind, erweist es sich als sinnvoller, die Gegenstandsbereiche etwas abstrakter zu fassen. Die Rede ist dann von:

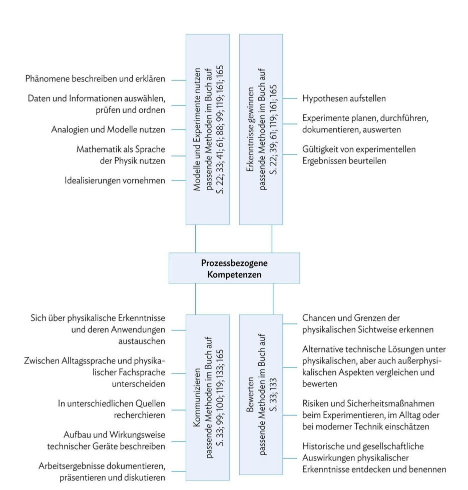
- Erhaltung und Gleichgewicht
  Beispiele: Energie- und Impulserhaltung; Kräftegleichgewicht
- Superposition und Komponenten
  Beispiele: Kräfteaddition; Zerlegung in Kraftkomponenten; Überlagerung von Wellen; Interferenz (Kap. 5 und 6)
- Mathematisieren und Vorhersagen
  Beispiele: Bewegung von Himmelskörpern (Kap. 3); Beschreibung von Schwingungen und von Wellen (Kap. 4 und 5); relativistische Mechanik (Kap. 8)
- Zufall und Determiniertheit
  Beispiele: Messabweichungen und Messunsicherheiten (Kap. 4); Beschreibung von Phänomenen durch Gesetzmäßigkeiten (Kap. 2 und 3); Photonen- und Wellenmodell des Lichts (Kap. 6); Methode der kleinen Schritte (Kap. 10)

Manche Inhalte der Physik lassen sich genau einem dieser Gegenstandsbereiche zuordnen, andere weisen aber ganz verschiedene Aspekte auf und gehören damit zu mehreren Gegenstandsbereichen.

Methoden (prozessbezogene Kompetenzen)

Viele Arbeitsweisen, die Sie an einer bestimmten Stelle im Physikunterricht kennengelernt haben, können Sie auch in anderen Bereichen nutzen. Zu diesen Arbeitsweisen gehört zunächst der Umgang mit den fachlichen Inhalten. Aber Sie haben auch erfahren, wie Sie selbständig Erkenntnisse gewinnen können, z. B. beim Planen von Experimenten. Außerdem ist in allen Bereichen wichtig, dass Sie mit Informationsquellen zielgerichtet umgehen können und Ihre Erkenntnisse mit anderen Menschen teilen können. Und schließlich soll der Physikunterricht Sie in die Lage versetzen, besser Entscheidungen zu treffen und Situationen zu bewerten, gleich ob im privaten oder im politischen Bereich. Erst mit all diesen verschiedenen Kompetenzen lässt sich das aktuelle physikalische Weltbild für Sie nutzbar machen.


Gegenstandsbereiche der Physik (Mittelstufe)
Materie
Magnetismus (Jgst. 7)
Dichte (Jgst. 7)
Elektrische Stromkreise (Jgst. 7)
Elektrische Energie (Jgst. 9)
Atome (Jgst. 9)
Teilchenmodell (Jgst. 9)
Thermischer Energietransport, Einflüsse auf unser Klima (Jgst. 9)
Kernphysik (Jgst. 10)
Energie
Mechanische Energie (Jgst. 9)
Elektrische Energie (Jgst. 9)
Atome (Jgst. 9)
Teilchenmodell (Jgst. 9)
Thermischer Energietransport, Einflüsse auf unser Klima (Jgst. 9)
Elektromagnetismus (Jgst. 10)
Impulserhaltung (Jgst. 10)
Bewegungen und ihre Modellierung in der Physik (Jgst. 10)
Kernphysik (Jgst. 10)
Systeme im Gleich- und Ungleichgewicht
Elektrische Stromkreise (Jgst. 7)
Elektrischer Strom (Jgst. 8)
Elektrische Energie (Jgst. 9)
Kräfte und ihre Wirkungen (Jgst. 8)
Atome (Jgst. 9)
Teilchenmodell (Jgst. 9)
Thermischer Energietransport, Einflüsse auf unser Klima (Jgst. 9)
Elektromagnetismus (Jgst. 10)
Wechselwirkung
Magnetismus (Jgst. 7)
Optische Phänomene (Jgst. 7)
Optik (Jgst. 8)
Elektrischer Stromkreis (Jgst. 7)
Elektrischer Strom (Jgst. 8)
Dynamik zweidimensionaler Bewegungen (Jgst. 8)
Impulserhaltung (Jgst. 10)
Bewegungen und ihre Modellierung in der Physik (Jgst. 10)
Kräfte und ihre Wirkungen (Jgst. 8)
Mechanische Energie (Jgst. 9)
Atome (Jgst. 9)
Teilchenmodell (Jgst. 9)
Elektromagnetismus (Jgst. 10)
Kernphysik (Jgst. 10)


Phänomene beschreiben und erklären
Daten und Informationen auswählen, prüfen und ordnen
Analogien und Modelle nutzen
Mathematik als Sprache der Physik nutzen
Idealisierungen vornehmen
Modelle und Experimente nutzen
passende Methoden im Buch auf
S. 22; 33; 41; 61; 88; 99; 119; 161; 165
Erkenntnisse gewinnen
passende Methoden im Buch auf
S. 22; 39; 61; 119; 161; 165
Hypothesen aufstellen
Experimente planen, durchführen, dokumentieren, auswerten
Gültigkeit von experimentellen Ergebnissen beurteilen
Prozessbezogene Kompetenzen
Sich über physikalische Erkenntnisse und deren Anwendungen austauschen
Zwischen Alltagssprache und physikalischer Fachsprache unterscheiden
In unterschiedlichen Quellen recherchieren
Aufbau und Wirkungsweise technischer Geräte beschreiben
Arbeitsergebnisse dokumentieren, präsentieren und diskutieren
Kommunizieren
passende Methoden im Buch auf
S. 33; 99; 100; 119; 133; 165
Bewerten
passende Methoden im Buch auf
S. 33; 133
Chancen und Grenzen der physikalischen Sichtweise erkennen
Alternative technische Lösungen unter physikalischen, aber auch außerphysikalischen Aspekten vergleichen und bewerten
Risiken und Sicherheitsmaßnahmen beim Experimentieren, im Alltag oder bei moderner Technik einschätzen
Historische und gesellschaftliche Auswirkungen physikalischer Erkenntnisse entdecken und benennen

Inhalte

Energieerhaltung .... Energie

Die Energie E ist hilfreich, um physikalische Messgrößen in Beziehung zu setzen. Sie kann Veränderungen hervorrufen und tritt in verschiedenen Formen auf. Die Energie kann von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden. Bei jeder Umwandlung bleibt die Gesamtmenge an Energie zu jeder Zeit erhalten. Ein Teil der umgewandelten Energie ist dabei immer innere Energie, die auf Reibungsprozesse zurückzuführen ist.

Einheit der Energie: 1 J (Joule) Beispiele für Energieformen:

- Bewegungsenergie
- Höhenenergie
- Spannenergie
- innere Energie
- chemische Energie
- elektrische Energie
- Lichtenergie

Höhenenergie .... Energie

Befindet sich ein Körper der Masse m in der Höhe h über einem gewählten Bezugsniveau, so hat er Höhenenergie E_h. Das Bezugsniveau kann je nach Bedarf gewählt werden, beispielsweise die Höhe über dem Erdboden. Formel: $E_h = m \cdot g \cdot h$

Einheit: 1 J (Joule)
Formelzeichen: E_h

Kinetische Energie (Bewegungsenergie) .... Energie

Bewegt sich ein Körper der Masse m mit der Geschwindigkeit v fort, so hat er kinetische Energie E_{kin}.
Formel: $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

Einheit: 1 J (Joule)
Formelzeichen: E_{kin}

Photonenmodell des Lichts .... Energie, Wechselwirkung

Jeder Lichtfarbe lässt sich eine bestimmte Energie zuordnen. Diese Energie wird in Energieportionen – den Photonen – transportiert. Die Energie der Photonen ist also abhängig von der Lichtfarbe. Dabei sind die Photonen von violettem Licht energiereicher als die Photonen von rotem Licht. Alle Photonen bewegen sich mit der gleichen Geschwindigkeit: der Lichtgeschwindigkeit. Photonen sind punktförmig und unteilbar.

Weil ein einzelnes Photon eine sehr geringe Energie hat, wird in diesem Zusammenhang häufig eine andere Einheit verwendet: das Elektronenvolt (eV).

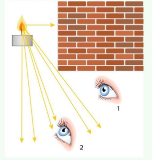
$1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$

An die Ränder des sichtbaren Lichts schließen sich die Infrarot-Strahlung (IR-Strahlung) und die Ultraviolett-Strahlung (UV-Strahlung) an. Die IR-Strahlung hat eine noch geringere Energie als rotes Licht, die UV-Strahlung eine noch höhere Energie als das violette Licht.

Lichtmodell und der Sehvorgang .... Wechselwirkung

Licht breitet sich geradlinig aus. Die Ausbreitung des Lichts kannst du mithilfe von Lichtstrahlen veranschaulichen. Das Licht, das von einem Körper ausgesendet wird, stellen wir durch repräsentative Lichtstrahlen dar.

Wir können einen Gegenstand dann sehen, wenn die Lichtstrahlen, die von ihm ausgehen, in unser Auge treffen. Das Licht breitet sich dabei geradlinig aus und wir können daher nicht „um die Ecke sehen“.



Elektrische Ladung, Stromstärke und Spannung .... Energie, Materie, Systeme

Die kleinste messbare elektrische Ladung Q ist die Elementarladung e. Ladungen auf Gegenständen treten nur als Vielfache N der Elementarladung auf:

$Q = -N \cdot e$ bzw. $Q = N \cdot e$

Die elektrische Stromstärke I ist ein Maß für die Ladungsmenge ΔQ, die pro Zeitspanne Δt durch einen Leitungsquerschnitt fließt.

Formel: $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{N \cdot e}{\Delta t}$

Die elektrische Spannung U gibt an, wie stark der Antrieb des elektrischen Stroms ist. Sie ist die Potentialdifferenz $\Delta\varphi$ zwischen zwei Punkten eines Stromkreises (vgl. die Höhendifferenz Δh eines Wasserstromkreises). Formel: $U = \Delta\varphi$

Einheit der Ladung:
1 C (Coulomb)
Formelzeichen: Q
Wert der Elementarladung:
$e = 1{,}602176634 \cdot 10^{-19}$ C

Einheit der Stromstärke:
1 A (Ampere)
Formelzeichen: I

Einheit der Spannung: 1 V (Volt)
Formelzeichen: U

Definition des elektrischen Widerstands .... Systeme

Die Definition des elektrischen Widerstands R eines Bauteils lautet:

$\text{Widerstand} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}}$ In Formelzeichen: $R = \frac{U}{I}$

Elektrischer Widerstand:
Formelzeichen: R
Einheit: 1 Ω (Ohm)

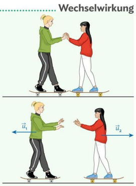
2. Newtonsches Gesetz .... Wechselwirkung

Das zweite Newtonsche Gesetz lässt sich auf zwei verschiedene Arten darstellen:

$F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$ und $F = m \cdot a$

Wechselwirkungsgesetz ...... Wechselwirkung

Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 eine Kraft F_1 aus, so übt Körper 2 auf Körper 1 eine gleichgroße, aber entgegengerichtete Kraft F_2 aus. Es ist nicht möglich, dass nur der eine Körper auf den anderen Körper eine Kraft ausübt: $-F_1 = F_2$
Haben die Körper 1 und 2 verschiedene Massen, ergeben sich unterschiedliche Geschwindigkeitsänderungen Δv_1 und Δv_2.
Das Wechselwirkungsgesetz wird auch als das 3. Newtonsche Gesetz bezeichnet. Man spricht auch von „Actio = Reactio".
Auch für die Gewichtskraft gilt das Wechselwirkungsgesetz: Jeder Körper auf der Erde wird nicht nur mit der Gewichtskraft angezogen, sondern zieht auch mit entgegengesetzter, aber gleichgroßer Kraft die Erde an.



Gewichtskraft und freier Fall ...... Wechselwirkung

Unter dem „freien Fall" versteht man eine geradlinige, beschleunigte Bewegung aus der Ruhe heraus in Richtung Erdmittelpunkt. Die Beschleunigung wird durch die Gewichtskraft F_G verursacht:

$F_G = m \cdot g$ mit $g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2}$ „Fallbeschleunigung"
Die Fallbeschleunigung g ist unabhängig von der Masse, Art und Gestalt des Körpers, wenn keine Reibungskräfte wirken; sie hängt aber vom Ort ab (Erde oder Mond; Äquator oder Pol; ...).
Dabei ist es wichtig, zwischen Masse und Gewichtskraft zu unterscheiden.

Wirken an einem Körper mehrere Kräfte, die sich gegenseitig ausgleichen, dann sagen wir: Der Körper befindet sich im Kräftegleichgewicht.

Geschwindigkeit ...... Wechselwirkung

Der Betrag der Geschwindigkeit einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit berechnet sich wie folgt:

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{zurückgelegter Weg}}{\text{dafür benötigte Zeit}}.$$

Mit Formelzeichen: $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

Der Betrag der Geschwindigkeit wird in der Einheit $\frac{m}{s}$ oder $\frac{km}{h}$ angegeben.

Formelzeichen: v
Einheit: $\frac{m}{s}$ oder $\frac{km}{h}$

Beispiel:

$\Delta x = 150$ m; $\Delta t = 5{,}00$ s; $v = ?$

$$v = \frac{150\ \text{m}}{5{,}00\ \text{s}} = 30{,}0\ \frac{m}{s}$$
$$= 30{,}0 \cdot 3{,}6\ \frac{km}{h} = 108\ \frac{km}{h}$$

Beschleunigung ...... Wechselwirkung

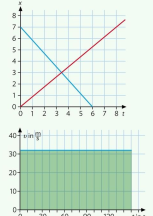
Als Beschleunigung bezeichnen wir die Änderung der Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitintervall.

Mit Formelzeichen: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

Formelzeichen: a
Einheit: $1\ \frac{m}{s^2}$ („Meter pro Sekunde im Quadrat")

Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit ...... Wechselwirkung

Die Geraden von Körpern mit gleicher Geschwindigkeit (Betrag und Richtung) verlaufen im t-x-Diagramm parallel. Die Richtung wird durch eine steigende bzw. fallende Gerade berücksichtigt. Der Betrag der Steigung entspricht dem Betrag der Geschwindigkeit des Körpers.

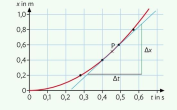


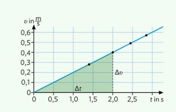
Eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit wird im t-v-Diagramm als waagrechte Gerade dargestellt. Die Fläche zwischen Gerade und t-Achse entspricht der zurückgelegten Strecke Δx.
Bewegt sich ein Körper mit konstanter Geschwindigkeit v_0 und befindet sich zum Zeitpunkt $t = 0$ am Ort x_0, so lautet seine Bewegungsfunktion (Ort x zur Zeit t):

$x(t) = v_0 \cdot t + x_0$

Bewegungen mit konstanter Beschleunigung ...... Wechselwirkung

Eine konstant beschleunigte Bewegung wird in einem t-x-Diagramm durch eine Parabel dargestellt.
Die Geschwindigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt kann im t-x-Diagramm durch die Steigung der Tangente an diesem Parabelpunkt ermittelt werden.
Bei einer Bewegung mit konstanter Beschleunigung nimmt die Geschwindigkeit mit der Zeit linear zu bzw. ab. Im t-v-Diagramm erhält man eine steigende ($a > 0$, „positive Beschleunigung“) bzw. fallende ($a < 0$, „negative Beschleunigung; Abbremsen“) Gerade. Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die Beschleunigung, der Flächeninhalt unterhalb für die zurückgelegte Strecke.
Wird ein Körper mit Anfangsgeschwindigkeit v_0 und Startort x_0 zum Zeitpunkt $t = 0$ konstant beschleunigt, gilt für den Ort x bzw. die Geschwindigkeit v zum Zeitpunkt t:
$x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$ und $v(t) = at + v_0$
Wird ein Körper zum Zeitpunkt $t = 0$ aus der Ruhelage heraus konstant beschleunigt und befindet sich sein Startort im Ursprung des Koordinatensystems, gilt für den Ort x bzw. die Geschwindigkeit v zum Zeitpunkt t:
$x = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$ und $v = a \cdot t$.





Methoden

Versuchsprotokoll .... Modelle und Experimente nutzen

Um die Ergebnisse eines Experiments festzuhalten, fertigt man ein Versuchsprotokoll an. Ein solches Protokoll besteht aus fünf Abschnitten:

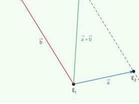
- **Ziel: Geben Sie** das Ziel des Versuchs kurz mit eigenen Worten wieder.
- **Aufbau:** Beschreiben Sie den experimentellen Aufbau. Fertigen Sie dazu auch eine Zeichnung an.
- **Beschreibung:** Beschreiben Sie, wie Sie den Versuch durchführen und welche Größen Sie messen.
- **Messergebnisse:** Halten Sie die Messergebnisse in Form einer Tabelle fest.
- **Auswertung:** Bestimmen Sie anhand der Messergebnisse die gesuchte Größe.

Die fünf Schritte können Sie sich gut über die Anfangsbuchstaben merken: ZABMA.

Addition von Pfeilen mit dem Pfeileparallelogramm .... Modelle und Experimente nutzen

Die erste Ecke E_1 des Pfeileparallelogramms steht für den betrachteten Körper.

- Zeichnen Sie die Pfeile $\vec{a}$ und $\vec{b}$ jeweils mit dem Fuß an den Eckpunkt E_1. Sie greifen gleichzeitig am Körper bzw. am Punkt E_1 an.
- Die Spitzen der Pfeile $\vec{a}$ und $\vec{b}$ markieren die Eckpunkte E_2 und E_3.
- Ergänzen Sie mithilfe des Geodreiecks die Parallelen zu den beiden Pfeilen so, dass deren Schnittpunkt die Ecke E_4 des Pfeileparallelogramms liefert (Parallelverschiebung der Pfeile $\vec{a}$ und $\vec{b}$).
- Der Diagonalpfeil von E_1 nach E_4 stellt den Pfeil für die Summe beider Pfeile $\vec{a}$ und $\vec{b}$ dar.



Methode .... Modelle und Experimente nutzen

Digitale Datenerfassung

1. **Vorüberlegungen durchführen**
   Überlegen Sie sich zunächst gut, welche Größen Sie messen wollen. Zur Bestimmung von Geschwindigkeiten müssen Sie meist die zurückgelegte Strecke und die dafür benötigte Zeit messen.
2. **Geeignetes Messsystem auswählen**
   Das von Ihnen gewählte Messsystem, z. B. eine App auf dem Smartphone, muss natürlich in erster Linie die Größen messen können, die Sie messen wollen. Sie sollten aber auch darauf achten, ob das System die Daten direkt auswerten kann.
3. **Messung sorgfältig planen**
   Berücksichtigen Sie bei Ihrer üblichen Planung der Messung das gewählte Messsystem. Machen Sie sich dazu Gedanken, wie Sie die Möglichkeiten der Messwerterfassung am besten nutzen können.
4. **Probemessungen durchführen**
   Machen Sie vor der eigentlichen Messung ein paar kurze Probemessungen, um sich mit dem Programm vertraut zu machen und eventuelle Probleme oder Einschränkungen zu erkennen.
5. **Messung durchführen**
   Führen Sie die Messung auf Basis Ihrer Planungen durch. Achten Sie beim Durchführen der Messung darauf, dass die Messwerte auch wirklich abgespeichert werden.
6. **Daten auswerten**
   Manche Apps können automatisch ein Diagramm aus Ihren Messdaten erstellen, bei anderen können Sie die Daten an einen PC übertragen und z. B. mit einem Tabellenkalkulationsprogramm auswerten.

Sachverhalte modellieren .... Erkenntnisse gewinnen

Um die physikalische Wirklichkeit gedanklich erfassbar zu machen, um sie zu verstehen und um nachvollziehbar argumentieren zu können, entwickeln wir Modelle. Das heißt, wir machen uns vereinfachte und möglichst anschauliche gedankliche Vorstellungen von physikalischen Phänomenen oder Objekten. Ein Modell beruht stets auch auf Annahmen und es vernachlässigt Teilaspekte, weshalb ein Modell die Wirklichkeit nie vollständig beschreibt. Dennoch werden physikalische Beobachtungen gut erklärbar, viele Vorgänge und Effekte lassen sich so korrekt vorhersehen.
Zur physikalischen Vorgehensweise gehört es, vor einem Experiment bisherige Erkenntnisse insbesondere in Form von Modellen zu nutzen, um zunächst Vermutungen aufzustellen und Vorhersagen zu treffen. Die Stärke eines Modells zeigt sich dann darin, dass die Vermutungen im Experiment bestätigt werden. Andernfalls ist die Modellvorstellung entsprechend zu korrigieren.

Messgenauigkeit .... Modelle und Experimente nutzen

Je nach Messgerät können Sie mehr oder weniger genau messen. Bei einem digitalen Multimeter können Sie sich an der letzten Stelle der Anzeige orientieren. Wenn die Anzeige z. B. 10,32 V lautet, dann können Sie bestenfalls auf 0,01 V genau messen. Das hat auch Auswirkungen auf Rechnungen. Es ist unsinnig, ein Ergebnis genauer anzugeben als die Werte, aus denen es berechnet wird. Für das Vorgehen gibt es eine Faustregel.

Faustregel:
Das Ergebnis einer Rechnung hat nur so viele gültige Ziffern wie der ungenaueste Messwert, der in der Rechnung verwendet wird. Gültige Ziffern (gZ) sind dabei alle vorkommenden Ziffern bis auf Nullen, die am Anfang stehen:
10,05 V hat 4 gZ, 0,05 V hat 1 gZ.

Beispiele:
9,406 V − 0,4 V = 9 V (wegen 1 gZ)
3,02 V + 0,040 V = 3,060 V = 3,1 V (wegen 2 gZ)

Physikalische Argumentationsweisen: Je-desto-Aussagen .... Kommunizieren

In der Physik kann man oft Beobachtungen bzw. Resultate bei Experimenten in Je-desto-Aussagen zusammenfassen. So kann man gut argumentieren und damit zu physikalischen Erkenntnissen gelangen. Eine mögliche Argumentation kann dann so lauten (vgl. Abbildung):
Je näher die Kerze an die Linse rückt...
- desto stärker divergieren die Lichtbündel, die von den Punkten der Kerze ausgehend auf die Linse fallen,
- desto weniger stark konvergieren diese Lichtbündel nach dem Durchgang durch die Linse,
- desto weiter von der Linse entfernt entsteht damit ein scharfer Bildpunkt,
- desto größer wird dadurch auch das Bild.

Insgesamt können wir unsere Überlegungen folgendermaßen zusammenfassen: Mithilfe des Brechungsgesetzes und dem Verständnis, wie Lichtbündel durch Sammellinsen beeinflusst werden, wird klar: *Je kleiner die Gegenstandsweite, desto größer die Bildweite.*
Diese Überlegungen gelten allerdings nur bis zur Grenze $f = g$.
Für $g < f$ gibt es kein reelles Bild mehr, stattdessen beobachtet man jetzt ein virtuelles Bild.

Hypothesen bilden .... Erkenntnisse gewinnen

Der Begriff „Hypothese“ beschreibt eine Vermutung, die durch ein Experiment bestätigt oder verworfen werden kann. In der Wissenschaft bezeichnet man dies als Verifikation bzw. als Falsifikation. Damit das möglich ist, muss eine gute Hypothese besondere Eigenschaften haben:

- Eine Hypothese muss überprüft werden können. In der Physik bedeutet das in der Regel, dass Sie eine Messung dazu durchführen können.
- Eine Hypothese muss klar und präzise formuliert werden. Vermeiden Sie deshalb ungenaue Begriffe wie „eher gut“, „eher schlecht“, „viel“, „wenig“, ...
- Zu einer Hypothese muss es eine klare Gegenhypothese geben. Nur so können Sie am Ende entscheiden, ob die Hypothese angenommen werden kann.
- Eine Hypothese muss zu deinem Vorwissen passen. Sie sollte also nicht Dingen widersprechen, die Sie bereits wissen.
- Eine Hypothese soll einen hohen Erklärungswert besitzen. Sie müssen also nicht alle möglichen denkbaren Einflüsse überprüfen, sondern können sich auf diejenigen beschränken, die Ihnen am plausibelsten erscheinen.

Gute Hypothesen zu finden ist nicht selbstverständlich; Sie sollten sich dabei gründlich Gedanken machen!

Untersuchung der Argumentationsweise .... Kommunizieren

In wissenschaftlichen Texten müssen Behauptungen immer gut begründet werden. Möglichkeiten:

- Durch logische Schlüsse ergibt sich aus einer wahren Aussage eine andere wahre Aussage: „Weil sich der elektrische Strom im Draht erhöht hat, erhöht sich auch seine Temperatur.“ Wichtig ist dabei, dass alle Möglichkeiten mit bedacht werden müssen, die diesen Zusammenhang stören könnten (der Draht könnte z. B. mit Wasser gekühlt werden).
- Bei einer Rechnung sorgen die mathematischen Gesetzmäßigkeiten dafür, dass wir aus Aussagen logische Schlüsse ziehen können: „Wenn der Draht einen elektrischen Widerstand von 0,50 Ω hat und an ihm eine Spannung von 6,0 V anliegt, dann fließt durch ihn ein Strom mit einer Stromstärke von 12 A.“
- Die Anfangsaussage einer Argumentationskette muss besonders gut begründet sein, meist durch eine Messung oder Beobachtung. Wenn sie selbst gemacht wurde, muss beschrieben werden, wie sie zustande gekommen ist (z. B. durch ein Versuchsprotokoll). Wenn die Messung oder Beobachtung von anderen stammt, muss diese Quelle gut dokumentiert werden und abrufbar sein.
- Eine Aussage kann leicht widerlegt werden, wenn sie durch logische Schlüsse auf eine andere, falsche Aussage führt: Wenn wir am schon beschriebenen Draht eine Stromstärke von 2,0 A messen, dann ist sein Widerstand eben nicht 0,50 Ω!

„Beurteilen“ und „Bewerten“ .... Bewerten

Beurteilen
1. Bestimmung eines Sachverhalts, z. B. des Ergebnisses eines Experiments
2. Festlegung von Kriterien bzw. Maßstäben
3. Urteil finden

Das Ziel einer Beurteilung ist eine fundierte und wissenschaftliche Aussage, bzw. ein Urteil über einen Sachverhalt, dem bestimmte Kriterien, bzw. Maßstäbe zugrunde liegen. Eine Beurteilung sollte objektiv und unabhängig überprüfbar sein. Eine Überprüfung sollte zum gleichen Ergebnis führen.

Bewerten
1. Bestimmung eines Sachverhalts, z. B. des Ergebnisses eines Experiments
2. Festlegung von Kriterien bzw. Maßstäben
3. Überlegung, welche Kriterien/Maßstäbe für die eigene Entscheidung von besonderer Bedeutung sind, inklusive Begründung
4. Wertentscheidung

Eine Bewertung ist eine wissenschaftlich fundierte Aussage, bei der auch gesellschaftliche Werte und Normen berücksichtigt werden.

Methode .... Bewerten

Bewerten und Nutzwertanalyse

Um die abschließende Entscheidung beim „Bewerten“ zu fällen, kann Ihnen eine Nutzwertanalyse helfen. Dabei entwerfen Sie ein Punktesystem, das Sie auf die Kriterien anwenden, die für Ihre Entscheidung relevant sind. Dadurch werden die Kriterienbereiche gewichtet und Sie können am Ende einfacher und transparenter Ihre Entscheidung fällen, die dann auch für andere besser nachvollziehbar wird.
Beispiel: *Ingo hat abends großen Hunger. Er überlegt, ob er die nicht mehr ganz so schmackhaften Reste vom Vortag essen soll oder ob er sich lieber etwas bestellt. Er könnte aber auch noch schnell mit dem Rad zum Supermarkt fahren, um etwas fürs Abendessen zu kaufen. Durch die Kälte und die Dunkelheit ist die Fahrt allerdings zum einen etwas ungemütlich, zum anderen durch die rutschige Fahrbahn nicht ganz ohne Unfallrisiko.*
Ingo hat also folgende drei **Entscheidungsmöglichkeiten**: Die Reste vom Vortag essen, etwas bestellen oder nochmal einkaufen fahren.
Zur Entscheidungsfindung lassen sich die fünf in der Tabelle dargestellten Kriterienbereiche identifizieren. Diese werden dann **gewichtet**: Ingo ist z. B. der Geschmack dabei am wichtigsten, die Gemütlichkeit am unwichtigsten. Entsprechend verteilt er für die fünf Kriterienbereiche die **Punkte** 1-5. Anschließend verteilt er **1-3 Punkte**, je nachdem, welche der drei Entscheidungsmöglichkeiten sein Kriterium am besten trifft. So ist das Essen der Reste am ökologischsten (3 Punkte); beim Einkaufen würde er die Reste zwar wegwerfen (2 Punkte), aber im Gegensatz zum Bestellen (1 Punkt) kann er immerhin besser auf die Verpackungen achten. Die so verteilten Punkte werden mit der jeweiligen Gewichtung **multipliziert** und am Ende **addiert.** Dadurch kann Ingo anhand der Punktzahl sehen, welche Entscheidung für ihn nach seinen festgelegten Kriterienbereichen die richtige ist.

Kriterienbereich	Gewichtung	Reste essen	bestellen	einkaufen
Geschmack	5	1 (· 5)	2 (· 5)	3 (· 5)
Umwelt	4	3 (· 4)	1 (· 4)	2 (· 4)
Kosten	3	3 (· 3)	1 (· 3)	2 (· 3)
Sicherheit	2	3 (· 2)	3 (· 2)	1 (· 2)
Gemütlichkeit	1	3 (· 1)	3 (· 1)	1 (· 1)
Summe		35	26	32

Ingo würde also die Reste vom Vortag essen, obwohl sie geschmacklich nur an dritter Stelle landen, dafür aber hinsichtlich Kosten, Umwelt, Sicherheit und Gemütlichkeit sehr hoch abschneiden.

Operator	Erklärung	Beispiel
abschätzen	durch begründete Überlegungen Größenwerte angeben (z. B. in Form einer Überschlagsrechnung)	Schätzen Sie die Genauigkeit Ihrer Messung ab. *Der Beschleunigungssensor hat einen Wert von 2,73 $\frac{m}{s^2}$ angezeigt. Der Messwert liegt also sicher zwischen 2,74 $\frac{m}{s^2}$ und 2,72 $\frac{m}{s^2}$.*
angeben / nennen	Formeln, Regeln, Sachverhalte, Begriffe oder Daten ohne Erläuterung wiedergeben	Nennen Sie drei gängige Modelle für das Licht. *Drei gängige Lichtmodelle sind das Strahlenmodell, das Photonenmodell und das Wellenmodell.*
begründen / nachweisen / zeigen	Gründe oder Argumente für eine Vorgehensweise oder einen Sachverhalt nachvollziehbar darstellen (auch eine rechnerische Bestätigung ist möglich)	Begründen Sie, dass ein Federpendel eine harmonische Schwingung vollführt. *Eine harmonische Schwingung liegt vor, wenn die rücktreibende Kraft der Schwingung direkt proportional und entgegengerichtet zur Auslenkung ist. Das ist für das Federpendel erfüllt, denn es gilt: $F(t) = -D \cdot s(t)$. D ist dabei die Federkonstante.*
berechnen	die Berechnung ist ausgehend von einem Ansatz darzustellen	Berechnen Sie die Frequenz einer Schwingung mit Schwingungsdauer $T = 25$ ms. $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}025\ \text{s}} = 40\ \frac{1}{\text{s}} = 40\ \text{Hz}$
beschreiben	Beobachtungen, Strukturen, Sachverhalte, Methoden, Verfahren oder Zusammenhänge strukturiert und unter Verwendung der Fachsprache formulieren	Beschreiben Sie die Energieumwandlungen, die bei einer Windenergieanlage stattfinden. *Die Bewegungsenergie des Winds wird in Bewegungsenergie der Rotorblätter und anschließend von einem Generator in elektrische Energie umgewandelt. Bei allen Prozessen findet auch eine Energieentwertung durch Umwandlung in innere Energie statt.*
bestimmen / ermitteln	nachvollziehbar ein Ergebnis oder einen Zusammenhang rechnerisch, graphisch oder experimentell finden	Bestimmen Sie mithilfe des Gravitationsgesetzes den Wert der Fallbeschleunigung g auf Meereshöhe. $G \cdot \frac{m \cdot M_{Erde}}{r^2} = m \cdot g$ $\Rightarrow g = G \cdot \frac{M_{Erde}}{r^2} = 6{,}674 \cdot 10^{-11}\ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot \frac{5{,}974 \cdot 10^{24}\ kg}{(6370 \cdot 10^3\ m)^2} = 9{,}826\ \frac{m}{s^2}$
beurteilen	zu einem Sachverhalt ein Sachurteil fällen, das mithilfe fachlicher Kriterien zu begründen ist	Beurteilen Sie die Gefahren, die von einer nassen Fahrbahn (durch Regen oder Schnee) bei einer Kurvenfahrt ausgehen. *Bei einer Kurvenfahrt wirkt die Haftreibungskraft zwischen Reifen und Fahrbahn als Zentripetalkraft. Verringert sich die Haftkraft, z. B. durch Schnee, verringert sich auch die Geschwindigkeit, mit der die Kurve sicher durchfahren werden kann. Bei einer nassen Fahrbahn besteht also ein erhöhtes Unfallrisiko, sofern man die Fahrgeschwindigkeit nicht verringert.*
bewerten	zu einem Sachverhalt ein Werturteil fällen, das unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Werte und Normen zu begründen ist; dabei muss die Argumentation stets auch Bezüge zur Physik haben	Bewerten Sie die Forderung, dass im Winter verstärkt Geschwindigkeitskontrollen von der Polizei durchgeführt werden sollen. *Lösung analog zum „beurteilen"-Operator mit der Ergänzung: Nachdem viele Menschen dazu neigen, sich nicht immer an die Geschwindigkeitsbegrenzungen zu halten und dieses Verhalten gerade im Winter große Gefahren für sich und andere birgt, stimme ich diesem Vorschlag unbedingt zu.*

entscheiden	wenn zur Entscheidung eine Begründung erwartet wird, muss diese ausdrücklich durch „entscheiden Sie begründet" eingefordert werden	Entscheiden Sie, welches der drei Modelle des Lichts am besten zur Vorhersage des Schattens, den der Mond auf die Erde wirft, geeignet ist. *Das Strahlenmodell ist dafür am besten geeignet.*
erklären	einen Sachverhalt oder Zusammenhang nachvollziehbar und verständlich machen, indem man ihn auf Fakten, Regeln und Gesetzmäßigkeiten zurückführt	Erklären Sie, dass der Mond trotz der wirkenden Gravitationskraft nicht auf die Erde stürzt. *Ohne die Gravitationskraft der Erde würde sich der Mond tangential zu seiner momentanen Kreisbahn von der Erde wegbewegen. Die Gravitationskraft wirkt also als Zentripetalkraft und hält den Mond auf einer (annähernd) stabilen Umlaufbahn.*
erläutern	einen Sachverhalt oder Zusammenhang veranschaulichend darstellen und durch zusätzliche Informationen (etwa durch selbst gewählte Beispiele oder Vergleiche) verständlich machen	Erläutern Sie, dass der Mond trotz der wirkenden Gravitationskraft nicht auf die Erde stürzt. *Lösung analog zum „erklären" Operator mit der Ergänzung: Das ist vergleichbar mit der Kugel eines Hammerwerfers: Das Stahlseil hält die Kugel auf ihrer Kreisbahn. Fällt die Kraft weg (der Hammerwerfer lässt los), bewegt sich die Kugel tangential fort.*
herleiten	mithilfe bekannter Gesetzmäßigkeiten einen Zusammenhang zwischen Größen herstellen	Leiten Sie einen Zusammenhang zwischen Winkel- und Bahngeschwindigkeit her. *Es gilt* $v = \frac{2\pi}{T} \cdot r$ *und* $\omega = \frac{2\pi}{T}$. *Daher ist* $v = \omega \cdot r$.
skizzieren	Sachverhalte, Prozesse, Strukturen oder Ergebnisse übersichtlich (und auf das Wesentliche reduziert) graphisch darstellen	Skizzieren Sie den Aufbau des Versuchs. *Hinweis: Aus Platzgründen wird an dieser Stelle auf eine Skizze eines Experiments verzichtet. Die Skizze sollte aber alle für den Aufbau des Experiments relevanten Informationen enthalten, diese aber sehr vereinfacht darstellen.*
Stellung nehmen	zu einer Aussage oder Problemstellung verschiedene Aspekte (z. B. Pro und Kontra oder Aspekte aus verschiedenen Blickwinkeln) reflektiert gegeneinander abwägen und zu einer abschließenden, begründeten Bewertung gelangen	Nehmen Sie dazu Stellung, dass es besonders bei Regen oder Schnee häufiger zu Fahrzeugunfällen in Kurven kommt. *Lösung analog zum „erklären" Operator mit der Ergänzung: Die „richtige" Geschwindigkeit ist aber manchmal auch schwer einzuschätzen, wenn man die Strecke z. B. schon häufig bei trockenem Wetter gefahren ist oder man die Strecke noch gar nicht kennt und deswegen zu spät abbremst. Man sollte bei Regen oder Schnee daher grundsätzlich darauf achten, dass man die Fahrgeschwindigkeit eher reduziert, besonders vor Kurven.*
vergleichen	Gemeinsamkeiten und Unterschiede kriteriengeleitet herausarbeiten (die Kriterien müssen ersichtlich sein)	Vergleichen Sie die beiden Quellen hinsichtlich ihrer Verständlichkeit miteinander. *Quelle A war insgesamt verständlicher als Quelle B, weil sie die gleichen Informationen in einfacherer Sprache und mit mehr Veranschaulichungen (Grafiken, Animationen) vermittelt hat.*
zeichnen	Objekte graphisch möglichst exakt darstellen	Zeichnen Sie das passende t-s-Diagramm der Schwingung. *Hinweis: Eine Zeichnung muss präziser sein als eine Skizze.*

Stichwortverzeichnis

Bildnachweis

AdobeStock / bennymarty – S. 12; - / DM7 – S. 161; - / Alejandro Tapia – S. 54; - / tomertu – S. 82; Alamy Stock Photo / Ajax News & Feature Service – S. 186; - / B.A.E. Inc. – S. 113, 203; - / CBW – S. 103; - / GRANGER - Historical Picture Archive – S. 102, 104; - / Heritage Images Partnership Ltd – S. 107; - / Historic Collection – S. 119; - / IanDagnall Computing – S. 108; - / MirrorImages – S. 121; - / Parmorama – S. 180; - / Pictorial Press Ltd – S. 128, 129; - / Science History Images – S. 37, 111, 115; - / SpaceEnhanced – S. 103, U4; - / The History Collection – S. 114; - / Mika Volkmann – S. 62; - / World History Archive – S. 12; ALPHA-Numerics GmbH – S. 161; Baaske Cartoons / Gerhard Mester – S. 140, 173, 178; © 1995 - 2023 CERN – S. 161; co2online gGmbH – S. 144; Rainer Dietrich, Schweinfurt – S. 52 (2), 53 (3), 61, 63, 65 (2), 73 (2), 77, 78 (2), 79, 83, 92 (2); - / LMU München – S. 91 (4); - / phyphox – S. 52, 93; - / Wolfram Mathematica – S. 68; DLR (CC BY 3.0) – S. 160; © Elsevier – S. 160 (2); ETH Zürich / Screenshot – S. 79; European Commission, Joint Research Centre, Photovoltaic solar electricity potential in European countries, Publications Office, 2018 – S. 163; Frank Finkenberg, Würzburg – S. 45, 101; Getty Images Plus / iStock Editorial, Giuliano Benzin – S. 20; - / iStockphoto, 24K-Production – S. 151; - / iStockphoto, 2happy – S. 154; - / iStockphoto, 3DSculptor – S. 160; - / iStockphoto, ALAMA – S. 185; - / iStockphoto, alexandre17 – S. 87; - / iStockphoto, alexsalcedo – S. 78; - / iStockphoto, bombermoon – S. 98, 132; - / iStockphoto, Nikita Burdenkov – S. 90; - / iStockphoto, Anastasiia Burlakova – S. 134; - / iStockphoto, Liudmila Chernetska – S. 183; - / iStockphoto, ciud – S. 57; - / iStockphoto, cjwhitewine – S. 87; - / iStockphoto, Creativemarc – S. 112; - / iStockphoto, cybrain – S. 120; - / iStockphoto, DaLiu – S. 78; - / iStockphoto, DanielPrudek – S. 138; - / iStockphoto, den-belitsky – S. 122; - / iStockphoto, dima_zel – S. 37; - / iStockphoto, DragonImages – S. 12; - / iStockphoto, Pavel Dyachenko – Cover; - / iStockphoto, efks – S. 78; - / iStockphoto, Evgeny555 – S. 36; - / iStockphoto, fad1986 – S. 192; - / iStockphoto, German-skydiver – S. 150; - / iStockphoto, GLYPHstock – S. 13; - / iStockphoto, Dmitrii Guldin – S. 178; - / iStockphoto, Tohid Hashemkhani – S. 53; - / iStockphoto, hiro-y – S. 68, 126; - / iStockphoto, Sabine Hortebusch – S. 138; - / iStockphoto, Ianm35 – S. 43; - / iStockphoto, jzehnder – S. 144; - / iStockphoto, Martin Keiler – S. 29; - / iStockphoto, Ljupco – S. 16; - / iStockphoto, lovelyday12 – S. 162; - / iStockphoto, Lugaaa – S. 16; - / iStockphoto, Buzun Maksimilian – S. 160; - / iStockphoto, MarcelC – S. 152, 177; - / iStockphoto, master1305 – S., 127; - / iStockphoto, mg7 – S. 151; - / iStockphoto, Francesco Milanese – S. 54; - / iStockphoto, MichaelNivelet – S. 118; - / iStockphoto, Miyuki-3 – S. 52; - / iStockphoto, nemoris – S. 86 (3); - / iStockphoto, ofc pictures – S. 162; - / iStockphoto, PeopleImages – S. 177; - / iStockphoto, ptasha – S. 134; - / iStockphoto, Rudenkoi – S. 19; - / iStockphoto, serebryakova – S. 36 (3); - / iStockphoto, Marcio Silva – S. 180; - / iStockphoto, Marina_Skoropadskaya – S. 14; - / iStockphoto, Smileus – S. 137; - / iStockphoto, suteishi – S. 121; - / iStockphoto, TebNad – S. 140, 146; - / iStockphoto, Joseph Thäle – S. 77; - / iStockphoto, the-lightwriter – S. 177; - / iStockphoto, Joaquin Traverso Traverso – S. 54; - / iStockphoto, Valengilda – Cover, 50, 51, 62; - / iStockphoto, vjanez – S. 44; - / iStockphoto, Morten Watkins – S. 16; - / iStockphoto, Jievani Weerasinghe – S. 98, 118; - / iStockphoto, Wirestock – S. 73; - / iStockphoto, Ulf Wittrock – S. 44; - / iStockphoto, Andrey Zhuravlev – S. 98; 102; - / iStockphoto, Vladislav Zolotov – S. 54; - / Photos.com – S. 106; - / The Image Bank, Matt Stroshane – S. 43; Günter Gerstmeier, Hilgertshausen-Tandern – S. 63, 64 (2); Carolin Gnebner / DESY – S. 179; imago images / Arnulf Hettrich – S. 32; - / imagebroker – S. 34; - / Leemage – S. 118, 179; - / Sven Simon – S. 172; - / ZUMA Press – S. 187; iStockphoto / alvarez – S. 173; - / Antagain – S. 134; - / apomares – S. 20; - / FatCamera – S. 174; - / Freder – S. 10, 11, 20; - / izusek – S. 172; - / no_limit_pictures – S. 175; Hans-Thomas Janka / Max-Planck-Institut für Astrophysik – S. 160; Rüdiger Janner, Heilsbronn – S. 81, 182, 188 (3); Maximilian Knogler & Klaus Mach – S. 168, 169, 170; Mauritius Images / United Archives, World History Archive – S. 107; © Microsoft Deutschland – S. 154 (2), 155 (6), 158 (4); Physikalisches Institut, Universität Freiburg – S. 127, 131; picture-alliance / akg-images, Rabatti – Dominigie – S. 13; - / AP Images, Takumi Harada – S. 30; - / dpa, Axel Heimken – S. 141; - / dpa, Karl-Josef Hildenbrand – S. 176; - / KEYSTONE, ZUST – S. 34; - / Manfred Kötter – S. 171; Pixabay / PIRO4D – S. 143, 174; Science Photo Library / Giphotostock – S. 78, 80 (2), 81, 84; - / WMAP Science Team, NASA – S. 103; Shutterstock / aappp – S. 28; - / COLOMBO NICOLA – S. 47; - / ded pixto – S. 172; - / DOUSSET Daniel – S. 36; - / MattLphotography – S. 110; - / Piti Tangchawalit – S. 148, 149, 150; Ruprecht Steinhübel, Wackersberg – S. 182 (8); Frederik Töpfer / www.leifiphysik.de – S. 95; © Christine Tröger – S. 176; Vaillant – S. 145; © www.leifiphysik.de / Joachim Herz Stiftung / Dr. Karl Remeis-Sternwarte, Erlangen-Nürnberg – S. 112; www.wiki.bildungsserver.de / IPCC (2007): Climate Change 2007, WG I: The Physical Science Basis, Figure SPM.5 – S. 160; www.wikimedia.org / A.J. Hanson (November/December 1994), CC BY-SA 2.5 – S. 160; - / Journal of Biological Chemistry. Band 279, Nummer 14, April 2004, S. 14001–14008, CC0 1.0 – S. 160; © Dietrich Zawischa – S. 78, 85.




C.C.BUCHNER
67051


ISBN 978-3-661-67051-5
9 783661 670515